

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE INTERSECÇÕES PRIORITÁRIAS

JOSÉ MIGUEL ALMEIDA FERREIRA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM VIAS DE COMUNICAÇÃO

Orientador: Professor Doutor Carlos Manuel Rodrigues

JUNHO DE 2014

Mestrado Integrado em Engenharia Civil
2013/2014

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2013/2014 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Carlos Manuel Rodrigues, por todo o apoio e por ter estado sempre disposto a ajudar-me e a esclarecer-me qualquer dúvida.

Queria também agradecer aos meus amigos e colegas de faculdade que sempre me acompanharam nesta etapa, enquanto aluno da FEUP.

Um agradecimento também aos meus pais, irmãos e restante família por estarem sempre presentes e por sempre acreditarem que seria possível eu cumprir esta fase importante da minha vida.

Por último, um agradecimento especial à Sofia, por todo o apoio e força que me transmitiu para que fosse possível elaborar esta dissertação.

RESUMO

As intersecções prioritárias são o tipo de intersecção mais utilizadas na rede viária em Portugal, quer em estradas que se desenvolvem em meio rural quer em arruamentos que se inserem em meio urbano. Neste tipo de intersecção, os veículos que se inserem nos movimentos não prioritários terão que aguardar a passagem dos veículos que se inserem em correntes de tráfego prioritárias, pelo que, regra geral, ficam sujeitos a atrasos, que serão tanto maiores quanto maior é o volume de tráfego. O HCM (Highway Capacity Manual) propõe uma metodologia para calcular os atrasos a que estão sujeitos os veículos dos movimentos não prioritários de modo a classificar o nível de serviço que a intersecção oferece.

Numa primeira fase, foi estudada a metodologia proposta de modo a perceber melhor o seu funcionamento. Devido à sua complexidade e sobretudo ao volume de cálculos que é necessário efetuar, a fase seguinte desta dissertação foi a realização de um programa que permite calcular, de forma automática e eliminando os erros que o cálculo manual poderia propiciar, o atraso a que estão sujeitos os condutores dos veículos que se inserem em movimentos não prioritários, bem como o nível de serviço da intersecção.

De seguida, e com o auxílio do programa desenvolvido, foi analisada a influência de alguns parâmetros adotados na metodologia do HCM para a determinação do nível de serviço em intersecções prioritárias, com o objetivo de identificar os mais relevantes no cálculo dos atrasos permitindo ainda quantificar diferentes valores dos atrasos para variações dos valores desses parâmetros adotados no HCM tendo por base a realidade norte-americana.

PALAVRAS-CHAVE: Intersecções prioritárias, nível de serviço, capacidade, atraso.

ABSTRACT

The two-way stop-controlled intersections are the type of intersection with wider applicability in Portugal, both in the rural areas as the urban level. In this type of intersection, traffic from the side street loses priority over the main road, where the crossing movements are performed without any delay, unlike the movements of the side street that always suffer delays because they have to yield to the traffic from the main road. The HCM (Highway Capacity Manual) proposes a methodology to calculate the delay experienced by drivers of the side street in order to rank their level of service.

Initially the proposed methodology was studied in order to better understand its functioning. Due to its complexity, the next phase of this work was the implementation of a program that automatically calculates the delay experienced by non-priority drivers well as their level of service. With this program there is no possibility of making mistakes, which could happen if all calculations were performed manually,

Then, with the help of the program developed some of the existing parameters in the HCM methodology for determining the level of service priority at two-way stop-controlled intersections, were varied so that it is possibly to understand which of these parameters have the most influence over the delay experienced by drivers

KEYWORDS: Two-way stop-controlled intersections, level of service, capacity, delay.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO.....	III
ABSTRACT	V
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. METODOLOGIA DE DETERMINAÇÃO DOS NÍVEIS DE SERVIÇO	3
2.1. INTRODUÇÃO	3
2.2. DETERMINAÇÃO DO NÍVEL HIERÁRQUICO DE CADA MOVIMENTO	3
2.3. DETERMINAÇÃO DOS VOLUMES DE PONTA DE CADA MOVIMENTO.....	4
2.4. DETERMINAÇÃO DOS VOLUMES CONFLITUANTES PARA CADA MOVIMENTO NÃO PRIORITÁRIO	4
2.5. CÁLCULO DO INTERVALO CRÍTICO E DO INTERVALO MÍNIMO	6
2.6. CÁLCULO DA CAPACIDADE POTENCIAL DE CADA MOVIMENTO NÃO PRIORITÁRIO.....	8
2.7. CÁLCULO DO FATOR DE IMPEDÂNCIA DE CADA MOVIMENTO E DA RESPECTIVA CAPACIDADE REAL	8
2.7.1. MOVIMENTOS DE NÍVEL 1	9
2.7.2. MOVIMENTOS DE NÍVEL 2	9
2.7.3. MOVIMENTOS DE NÍVEL 3	10
2.7.4. MOVIMENTOS DE NÍVEL 4	11
2.8. VIAS PARTILHADAS.....	14
2.9. CÁLCULO DO ATRASO POR MOVIMENTO	14
2.9.1. MOVIMENTOS DE NÍVEL 1	15
2.9.2. RESTANTES MOVIMENTOS	15
2.10. DETERMINAÇÃO DO NÍVEL DE SERVIÇO	16
2.11. CÁLCULO DOS INDICADORES DE DESEMPENHO.....	16
3. CÁLCULO AUTOMÁTICO DOS ATRASOS DOS MOVIMENTOS NÃO PRIORITÁRIOS.....	19
3.1. INTRODUÇÃO	19
3.2. DADOS NECESSÁRIOS	19
3.3. ESTRUTURA DO PROGRAMA DE CÁLCULO AUTOMÁTICO	20
3.4. EXEMPLO	22
3.3.1. DADOS.....	22

3.3.2. RESOLUÇÃO	23
------------------------	----

4. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE PARÂMETROS BASE

31

4.1. INTRODUÇÃO	31
------------------------------	-----------

4.2. INTERSECÇÕES PRIORITÁRIAS COMPOSTAS POR 3 RAMOS (ENTRONCAMENTOS)	31
--	-----------

4.2.1. VIA EXCLUSIVA DESTINADA ÀS VIRAGENS À ESQUERDA	31
---	----

4.2.2. TEMPO CRÍTICO BASE	34
---------------------------------	----

4.2.3. INTERVALO MÍNIMO DE BASE	35
---------------------------------------	----

4.3. INTERSECÇÕES PRIORITÁRIAS COMPOSTAS POR 4 RAMOS	36
---	-----------

4.3.1. VIA EXCLUSIVA DESTINADA ÀS VIRAGENS À ESQUERDA	36
---	----

4.3.2. TEMPO CRÍTICO BASE	39
---------------------------------	----

4.3.3. INTERVALO MÍNIMO DE BASE	40
---------------------------------------	----

4.3.4. PERCENTAGEM DE PESADOS	41
-------------------------------------	----

4.3.5. MOVIMENTOS EM UMA OU DUAS FASES	42
--	----

5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

45

5.1. CONCLUSÃO	45
-----------------------------	-----------

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	46
--	-----------

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. – Níveis hierárquicos dos movimentos em intersecções prioritárias de 3 ou 4 ramos (adaptada do HCM 2010).....	4
Figura 2.2. Numeração dos movimentos possíveis numa intersecção prioritária	5
Figura 2.3. Método de cálculo dos volumes conflituantes para s diferentes movimentos não prioritários (adaptado de Apontamentos de CT1)	5
Figura 2.4. Relação entre p' e p''	13
Figura 3.1. Organograma referente aos passos seguidos pelo programa	20
Figura 3.2. Aspeto inicial do programa	21
Figura 3.3. Planta da intersecção prioritária que será alvo de estudo	22
Figura 3.4. Aspeto do programa depois de inseridos os dados do problema	23
Figura 3.5. Volumes de ponta para cada movimento (Passo 2)	24
Figura 3.6. Volumes conflituantes para cada movimento (Passo 3).....	24
Figura 3.7. Valores dos intervalos crítico e mínimo para movimentos apenas numa fase.....	25
Figura 3.8. Valores dos intervalos crítico e mínimo para movimentos em 2 fases.....	25
Figura 3.9. Valores das capacidades potenciais por movimento.....	26
Figura 3.10. Probabilidades de os movimentos de nível hierárquico superior não formarem fila de espera	26
Figura 3.11. Valores do fator de ajuste e da variável intermédia para os movimentos de nível 3	27
Figura 3.12. Valores da capacidade real dos movimentos de nível 3	27
Figura 3.13. Valores do fator de ajuste e da variável intermédia para os movimentos de nível 4	27
Figura 3.14. Valores da capacidade real dos movimentos de nível 4	27
Figura 3.15. Valores da capacidade real de cada movimento	28
Figura 3.16. Valores da capacidade das vias partilhadas calculados quer para 1 quer para 2 fases..	28
Figura 3.17. Atraso dos movimentos da rua principal.....	28
Figura 3.18. Atraso dos movimentos da rua secundária.....	29
Figura 3.19. Níveis de serviço.....	29
Figura 4.1. Volumes iniciais utilizados no caso de estudo 4.2.1.....	32
Figura 4.2. Atraso em função do volume de tráfego na rua principal	32
Figura 4.3. Volumes iniciais utilizados no caso de estudo 4.2.1.....	33
Figura 4.4. Atraso em função do volume de tráfego na rua secundária	33
Figura 4.5. Variação do atraso com o tempo crítico base	35
Figura 4.6. Variação do atraso com o intervalo mínimo de base.....	36

Figura 4.7. Volumes iniciais utilizados no caso de estudo 4.3.1	37
Figura 4.8. Atraso em função do volume de tráfego na rua principal	37
Figura 4.9. Volumes iniciais utilizados no caso de estudo 4.3.1	38
Figura 4.10. Atraso em função dos volumes de tráfego da rua secundária.....	38
Figura 4.11. Variação do atraso com o tempo crítico base	40
Figura 4. 12. Variação do atraso com o intervalo mínimo de base	41
Figura 4.13. Variação do atraso com a percentagem de pesados	42
Figura 4.14. Atraso em função do volume de tráfego na rua principal	43

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1. Valores do tempo crítico base a utilizar no cálculo do intervalo crítico	7
Quadro 2.2. Valores do intervalo mínimo base a utilizar no cálculo do intervalo mínimo	7
Quadro 2.3. Correspondência entre o atraso sentido e o nível de serviço do movimento	16
Quadro 3.1. Matriz origem/destino da intersecção prioritária	23

1

INTRODUÇÃO

As intersecções prioritárias, em todas as suas diferentes formas geométricas, são o tipo de intersecção que mais é utilizada em Portugal. É uma solução de intersecção que, através de sinalização adequada constituída por sinais verticais e marcas rodoviárias, permite que todos os condutores percebam os diferentes níveis de prioridade de cada movimento de tráfego, sendo pouco exigente em termos de espaço e de sinalização, logo com baixos custos envolvidos. As duas formas geométricas de intersecções prioritárias são as intersecções compostas por quatro ramos (cruzamentos) ou as compostas por três ramos (entroncamentos). Nos cruzamentos, existem duas ruas que se cruzam onde os dois ramos pertencentes à rua secundária perdem prioridade em relação aos dois ramos da rua principal. Por razões de fluidez de tráfego e segurança este tipo de intersecção é mais adequado a situações em que o volume de tráfego na rua secundária não seja muito elevado. Os entroncamentos são compostos por três ramos, sendo que a rua que tem continuidade tem, normalmente, prioridade sobre o outro ramo.

Nas intersecções, o mesmo espaço é requerido, muitas vezes, por mais do que um veículo, sendo pontos críticos de uma rede viária, pelo que se torna relevante o estudo das intersecções, particularmente das prioritárias, com vista a tornar estes pontos da rede viária mais seguros e mais eficazes.

Numa qualquer intersecção prioritária existem quatro tipos de conflitos rodoviários. Estes conflitos resultam do facto de diferentes condutores que pretendam realizar movimentos diferentes necessitem do mesmo espaço para a realização desses mesmos movimentos e podem ser dos seguintes tipos:

- **Divergência:** tipo de conflito com menos riscos para o condutor. Resulta da separação de uma corrente de tráfego em duas ou mais correntes de tráfego diferentes;
- **Convergência:** com mais risco para o condutor. Resulta quando duas correntes de tráfego se juntam numa só;
- **Atravessamento:** manobra característica das intersecções prioritárias compostas por quatro ramos, quando o condutor pretende realizar o movimento de “ida em frente” conflituando com todos os outros movimentos da intersecção.
- **Entrecruzamento:** composto normalmente por uma manobra de convergência, seguida de uma manobra de divergência. Mais usual em ramos de ligação.

É devido à existência de todos estes conflitos que, nas intersecções prioritárias, são definidos os movimentos com e sem prioridade de modo a evitar-se que todos os condutores avancem ao mesmo tempo, evitando também acidentes.

Como já foi referido anteriormente, nas intersecções prioritárias há sempre pelo menos um dos ramos que perde prioridade para os outros. Assim, os movimentos que se realizam a partir desse mesmo ramo são chamados de movimentos não prioritários. O facto de os veículos que pretendem realizar estes

movimentos terem de ceder passagem aos veículos que pretendem realizar os movimentos com prioridade conduz a que os veículos que se inserem nos movimentos não prioritários sofram atrasos. Assim, é importante a quantificação deste atraso para se perceber até que ponto a intersecção prioritária é eficaz.

Com o objetivo de analisar todas as componentes do sistema viário, surgiu, em 1950, a primeira versão do HCM (*Highway Capacity Manual*). O HCM é uma obra publicada pelo TBR (*Transportation Research Board*) que contém conceitos, diretrizes e procedimentos para calcular a capacidade e o nível de serviço de diferentes obras rodoviárias. O HCM já vai na sua quinta edição (2010) e tem sido atualizado, adaptando-se sempre à realidade atual.

É importante também perceber o significado de nível de serviço. Segundo o HCM, nível de serviço é uma medida que varia entre o nível A e F em que cada um dos níveis representa a qualidade do serviço prestado aos condutores, sendo que A é o melhor e F o pior. No caso das intersecções prioritárias, o indicador selecionado para quantificar o nível de serviço é o atraso sentido pelos condutores inseridos nas correntes de tráfego não prioritárias.

No que diz respeito às intersecções prioritárias, a metodologia utilizada no HCM é muito trabalhosa pois envolve muitos cálculos intermédios e pode facilmente induzir o utilizador em erro. Assim, o principal objetivo desta dissertação foi o desenvolvimento de uma ferramenta de cálculo automático em que é apenas necessária a introdução das características da intersecção prioritária, tanto geométricas como de tráfego. Com esta ferramenta todos os cálculos são realizados automaticamente e o nível de serviço de cada movimento não prioritário de uma dada intersecção prioritária é apresentado em poucos segundos. Por outro lado, já com o auxílio do programa desenvolvido, foi possível realizar um estudo mais profundo das intersecções prioritárias que permitiu perceber que variáveis mais influenciam o seu desempenho global.

Para atingir os objetivos delineados, a presente dissertação foi organizada da seguinte forma:

- Capítulo 1: Introdução. Capítulo onde se explica tudo o que será alvo de estudo na dissertação, e onde se faz uma breve referência histórica ao HCM;
- Capítulo 2: Metodologia de determinação dos níveis de serviço. Neste capítulo expõe-se a metodologia utilizada pelo HCM na determinação dos níveis de serviço de intersecções prioritárias;
- Capítulo 3: Cálculo automático do atraso dos movimentos não prioritários. Neste capítulo explica-se como foi realizado o programa e apresenta-se um exemplo resolvido, demonstrando a facilidade na sua utilização;
- Capítulo 4: Análise da influência da variação de parâmetros base. Neste capítulo realizou-se um estudo mais profundo das intersecções prioritárias para perceber quais são os fatores com maior impacte na determinação do nível de serviço.
- Capítulo 5: Conclusões. Neste capítulo referem-se as conclusões gerais assim como possíveis desenvolvimentos futuros.

2

METODOLOGIA DE DETERMINAÇÃO DOS NÍVEIS DE SERVIÇO

2.1. INTRODUÇÃO

O HCM 2010 (*Highway Capacity Manual*) define, para intersecções prioritárias, o atraso como critério para a determinação do nível de serviço de um dado movimento. Este atraso é calculado para cada movimento e não para a intersecção como um todo. É de notar também que é apenas calculado para os veículos não prioritários pois é expectável que os veículos prioritários não experimentem qualquer tipo de atraso. O método para o cálculo do atraso e, consequentemente, para a determinação do nível de serviço é explicado de seguida.

2.2. DETERMINAÇÃO DO NÍVEL HIERÁRQUICO DE CADA MOVIMENTO

O primeiro passo para a determinação do nível de serviço de uma intersecção prioritária é definir, para cada movimento, o seu nível hierárquico. Este passo é importante na realização dos passos seguintes da metodologia pois permite ao utilizador identificar desde logo os movimentos em que se vai verificar atraso e onde, consequentemente, se vão formar filas de espera.

Assim, os níveis hierárquicos são definidos da seguinte forma (figura 2.1):

- Nível 1: movimentos de atravessamento na rua principal e viragens à direita da rua principal;
- Nível 2: viragens à esquerda da rua principal e viragens à direita da rua secundária;
- Nível 3: movimentos de atravessamento na rua secundária (nas intersecções de 4 ramos), e viragens à esquerda da rua secundária (nas intersecções de apenas 3 ramos);
- Nível 4: viragens à esquerda da rua secundária (nas intersecções de 4 ramos).

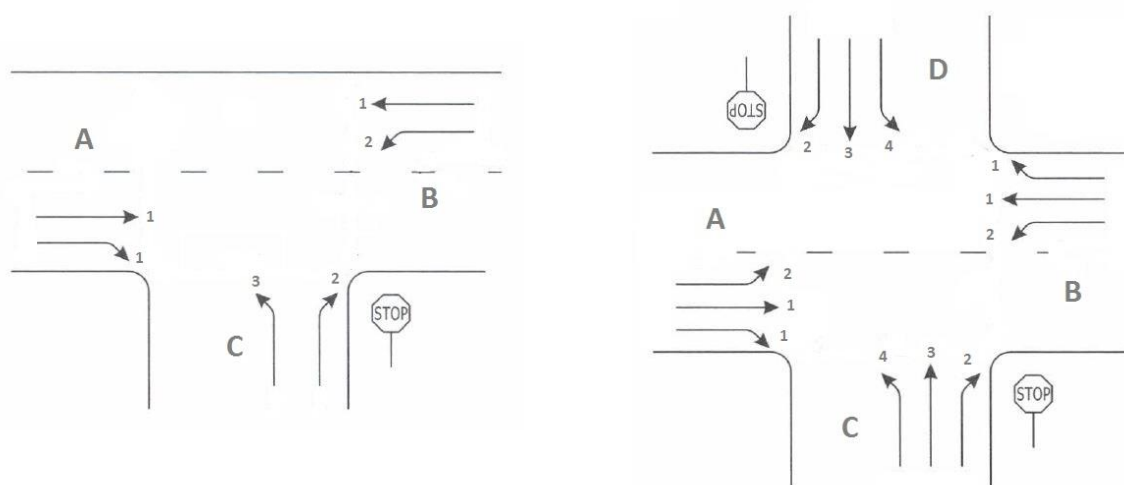


Figura 2.1. – Níveis hierárquicos dos movimentos em intersecções prioritárias de 3 ou 4 ramos (adaptada do HCM 2010)

2.3. DETERMINAÇÃO DOS VOLUMES DE PONTA DE CADA MOVIMENTO

O volume de ponta de cada movimento não é mais do que o volume máximo que se observa numa dada intersecção. Ou seja, em intersecções em que sejam conhecidos os volumes dos 15 minutos mais carregados do dia, o volume de ponta horário é o resultado da multiplicação desse volume por 4. Quando apenas se conhece os volumes para a hora mais carregada (e não dos 15 minutos mais carregados), ou quando se pretende calcular o nível de serviço para uma intersecção que ainda está a ser projetada, o volume de ponta horária é obtido utilizando o fator de ponta horário, como se observa na equação 2.1.

$$v_i = \frac{V_i}{FPH} \quad (2.1)$$

Em que:

v_i : volume de ponta do movimento i (veíc/h);

V_i : volume da hora mais carregada do movimento i (veíc/h);

FPH : fator de ponta horário.

2.4. DETERMINAÇÃO DOS VOLUMES CONFLITUANTES PARA CADA MOVIMENTO NÃO PRIORITÁRIO

Cada movimento de uma intersecção prioritária enfrenta vários pontos de conflito. Numa intersecção prioritária existem quatro tipos de pontos de conflito, as divergências, as convergências, os atravessamentos e os entrecruzamentos. Para os movimentos não prioritários, ou seja, todos os movimentos exceto os de nível 1, é necessário calcular os volumes conflituantes. Designa-se por volume conflituante a combinação de todos os volumes que interferem com um dado movimento tendo em conta o peso relativo de cada um. A figura 2.3 explica como calcular o volume conflituante de cada

movimento. É necessário ter em atenção que a numeração dos movimentos pode ser consultada na figura 2.2 e em nada tem a ver com o nível hierárquico do movimento.

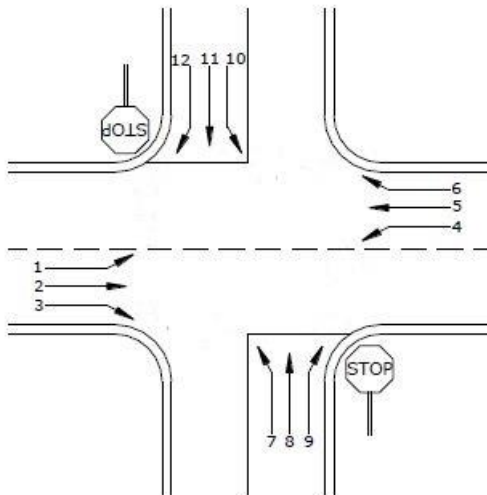


Figura 2.2. Numeração dos movimentos possíveis numa intersecção prioritária

	MOVIMENTOS CONFLITUANTES		VOLUMES CONFLITUANTES
Viragem à esquerda da via prioritária ($V_{c,1}$; $V_{c,4}$)			$V_{c,1} = V_5 + V_6^{(3)}$ $V_{c,4} = V_2 + V_3^{(3)}$
Viragem à direita da via secundária ($V_{c,9}$; $V_{c,12}$)			$V_{c,9} = \frac{V_2^{(2)}}{N} + 0.5V_3^{(1)}$ $V_{c,12} = \frac{V_3^{(2)}}{N} + 0.5V_6^{(1)}$
Atravessamentos ($V_{c,8}$; $V_{c,11}$) ⁽¹⁾	<p>2ª FASE</p> <p>1ª FASE</p>	<p>1ª FASE</p> <p>2ª FASE</p>	<p>1ª Fase</p> $V_{c,I,8} = 2V_1 + V_2 + 0.5V_3^{(1)}$ $V_{c,I,11} = 2V_4 + V_5 + 0.5V_6^{(1)}$ <p>2ª Fase</p> $V_{c,II,8} = 2V_4 + V_5 + V_6^{(3)}$ $V_{c,II,11} = 2V_1 + V_2 + V_3^{(3)}$
Viragem à esquerda da via secundária ($V_{c,7}$; $V_{c,10}$) ⁽¹⁾	<p>2ª FASE</p> <p>1ª FASE</p>	<p>1ª FASE</p> <p>2ª FASE</p>	<p>1ª Fase</p> $V_{c,I,7} = 2V_1 + V_2 + 0.5V_3^{(1)}$ $V_{c,I,10} = 2V_4 + V_5 + 0.5V_6^{(1)}$ <p>2ª Fase</p> $V_{c,II,7} = 2V_4 + \frac{V_5}{N} + 0.5V_6^{(6)} + 0.5V_{12}^{(4,5)} + 0.5V_{11}$ $V_{c,II,10} = 2V_1 + \frac{V_2}{N} + 0.5V_3^{(6)} + 0.5V_9^{(4,5)} + 0.5V_8$

Figura 2.3. Método de cálculo dos volumes conflituantes para s diferentes movimentos não prioritários (adaptado de Apontamentos de CT1)

No cálculo dos volumes conflitantes indicado na figura 2.3 é necessário ter em conta alguns aspetos:

1. Se existir via de desaceleração no ramo principal, elimina-se v_3 e v_6 ;
2. No caso de múltiplas vias no ramo principal, o tráfego a atribuir à via mais à direita será dado por v_2/N ou v_5/N , onde N é o número de vias afetas ao movimento de ida em frente;
3. Se a viragem à direita do ramo secundário for provida de ilhéu direcional e associada a uma perda de prioridade, elimina-se v_9 e v_{12} ;
4. No caso de múltiplas vias na estrada principal, ou se a viragem à direita a partir da via secundária for provida de ilhéu direcional, elimina-se v_9 e v_{12} ;
5. No caso de múltiplas vias no ramo principal, elimina-se v_3 no tráfego conflituante de 10 e v_6 no conflituante de 7;
6. No caso de não existir atravessamentos em duas fases, o tráfego conflituante corresponde ao somatório dos tráfegos relativos à 1ª e 2ª fase de atravessamento.

2.5. CÁLCULO DO INTERVALO CRÍTICO E DO INTERVALO MÍNIMO

O intervalo crítico é definido como o mínimo intervalo de tempo entre veículos numa corrente de tráfego da rua principal que permite a entrada de um veículo da rua secundária nessa corrente de tráfego. Este intervalo crítico pode ser estimado com base em observações ou pode ser calculado através da equação 2.2.

$$t_{c,x} = t_{c,base} + t_{c,VP} * P_{VP} + t_{c,G} * G - t_{3,LT} \quad (2.2)$$

Em que:

$t_{c,x}$: intervalo crítico para o movimento x (em segundos);

$t_{c,base}$: intervalo crítico base (ver Quadro 2.1.);

$t_{c,VP}$: fator de ajuste para veículos pesados (1 se a rua principal for de uma via em cada sentido, 2 se for de duas ou três vias em cada sentido);

P_{VP} : proporção de veículos pesados por movimento (expressa em número decimal);

$t_{c,G}$: fator de ajuste devido à inclinação das vias (0,1 para os movimentos 9 e 12 ou 0,2 para os movimentos 7, 8, 10 e 11);

G : inclinação (expressa em percentagem);

$t_{3,LT}$: fator de ajuste devido à geometria da intersecção (0,7 nas viragens à esquerda da rua secundária numa intersecção de três ramos ou 0 nos outros casos).

Quadro 2.1. Valores do tempo crítico base a utilizar no cálculo do intervalo crítico

	Tempo crítico base (s)		
	2 vias	4 vias	6 vias
Viragem à esquerda da rua principal	4,1	4,1	5,3
Viragem à direita da rua secundária	6,2	6,9	7,1
Atravessamento na rua secundária	1 fase: 6,5	1 fase: 6,5	1 fase: 6,5
	2 fases, fase 1: 5,5	2 fases, fase 1: 5,5	2 fases, fase 1: 5,5
	2 fases, fase 2: 5,5	2 fases, fase 2: 5,5	2 fases, fase 2: 5,5
Viragem à esquerda da rua secundária	1 fase: 7,1	1 fase: 7,5	1 fase: 6,4
	2 fases, fase 1: 6,1	2 fases, fase 1: 6,5	2 fases, fase 1: 7,3
	2 fases, fase 2: 6,1	2 fases, fase 2: 6,5	2 fases, fase 2: 6,7

O intervalo mínimo é o período de tempo compreendido entre o início da marcha de um veículo na rua secundária e o início da marcha do veículo imediatamente a seguir. O intervalo mínimo é calculado segundo a equação 2.3.

$$t_{f,x} = t_{f,base} + t_{f,VP} * P_{VP} \quad (2.3)$$

Em que,

$t_{f,x}$: intervalo mínimo associado ao movimento x (em segundos);

$t_{f,base}$: intervalo mínimo de base (ver Quadro 2.2.);

$t_{f,VP}$: fator de ajuste devido à presença de veículos pesados (0,9 se a rua principal tiver uma via em cada sentido e 1 se a rua principal tiver duas ou três vias por sentido);

P_{VP} : proporção de veículos pesados por movimento.

Quadro 2.2. Valores do intervalo mínimo base a utilizar no cálculo do intervalo mínimo

	Intervalo mínimo de base (s)		
	2 vias	4 vias	6 vias
Viragem à esquerda da rua principal	2,2	2,2	3,1
Viragem à direita da rua secundária	3,3	3,3	3,9
Atravessamento na rua secundária	4	4	4
Viragem à esquerda da rua secundária	3,5	3,5	3,8

Os valores apresentados nos quadros 2.1. e 2.2. são estimados com base em estudos realizados maioritariamente nos Estados Unidos da América.

2.6. CÁLCULO DA CAPACIDADE POTENCIAL DE CADA MOVIMENTO NÃO PRIORITÁRIO

A capacidade potencial de um movimento representa o número máximo de veículos que podem iniciar a marcha num intervalo de tempo, dependendo das condições de circulação, sendo dada pela equação 2.4.

$$C_{p,x} = v_{c,x} \frac{e^{-\frac{v_{c,x} * t_{c,x}}{3600}}}{1 - e^{-v_{c,x} * \frac{t_{f,x}}{3600}}} \quad (2.4)$$

em que,

- $C_{p,x}$: capacidade potencial do movimento x (veículos/hora);
- $v_{c,x}$: volume conflituante para o movimento x (veículos/hora);
- $t_{c,x}$: tempo crítico para o movimento x (segundos);
- $t_{f,x}$: intervalo mínimo para o movimento x (segundos).

O seu valor corresponde portanto, ao número de intervalos de tempo entre veículos consecutivos da corrente de tráfego principal que são iguais ou superiores ao intervalo crítico, permitindo assim que os veículos não prioritários iniciem o seu movimento.

Em intersecções em que os movimentos de nível 3 e 4 se façam em duas fases, a capacidade potencial é calculada por três vezes: para a primeira fase, para a segunda fase e assumindo que os movimentos se fazem apenas numa fase.

2.7. CÁLCULO DO FATOR DE IMPEDÂNCIA DE CADA MOVIMENTO E DA RESPECTIVA CAPACIDADE REAL

Numa intersecção prioritária, nem todos os intervalos de tempo que são considerados aceitáveis são aproveitados pelos condutores das vias não prioritárias. Isto acontece quando dois veículos não prioritários aguardam simultaneamente por uma oportunidade de avançar. Neste caso, o veículo não prioritário com nível hierárquico superior avança na primeira oportunidade enquanto o outro veículo tem de esperar pela oportunidade seguinte. Assim, é necessário calcular um fator de impedância, fator de ajuste que transforma o valor da capacidade potencial em capacidade real. A capacidade real é obtida a partir da equação 2.5.

$$C_{m,x} = C_{p,x} * f_k \quad (2.5)$$

Em que:

- $C_{m,x}$: Capacidade real do movimento x (veículos/hora);
- $C_{p,x}$: Capacidade potencial do movimento x (veículos/hora);
- f_k : fator de impedância.

O valor da impedância é obtido pela probabilidade de não existirem, na intersecção, veículos de nível hierárquico superior ao do movimento x , que aguardem por um intervalo de tempo aceitável para realizarem o seu movimento. Este valor é obtido pela equação 2.6.

$$p_{0,x} = 1 - \frac{v_x}{c_{m,x}} \quad (2.6)$$

Em que:

$p_{0,x}$: probabilidade do movimento conflituante de nível hierárquico superior não formar fila de espera;

v_x : volume do movimento j (veículos/hora);

$c_{m,x}$: capacidade potencial do movimento j (veículos/hora).

2.7.1. MOVIMENTOS DE NÍVEL 1

Não é expectável que os movimentos de nível 1, ou seja, movimentos prioritários, sejam impedidos de avançar por movimentos de nível hierárquico inferior. Assim, também não é expectável que sofram atraso.

2.7.2. MOVIMENTOS DE NÍVEL 2

Os movimentos de nível 2 (viragens à esquerda da rua principal e viragens à direita da rua secundária) são obrigados a ceder passagem aos movimentos prioritários. Contudo, os veículos que pretendam realizar um movimento de nível 2 são aqueles que aproveitam o primeiro intervalo de tempo aceitável na corrente de tráfego principal para avançar, logo para estes movimentos o fator de impedância é igual a 1 e a capacidade real igual à potencial.

Caso Especial

Se não existir uma via exclusiva para as viragens à esquerda da rua principal, ou, se existir, tiver uma extensão demasiado curta, pode acontecer que os veículos de nível hierárquico 1 fiquem bloqueados pelos veículos que pretendam virar à esquerda. Neste caso, é necessário calcular a probabilidade de não existir fila de espera na via partilhada ou na via curta. Esta probabilidade é dada pela equação 2.7.

$$p_{0,j}^* = 1 - (1 - p_{0,j}) * \left[\sqrt[n_L+1]{1 + \frac{x_{i,1+2}^{(n_L+1)}}{1 - x_{i,1+2}}} \right] \quad (2.7)$$

$$x_{i,1+2} = \frac{v_{i1}}{s_{i1}} + \frac{v_{i2}}{s_{i2}} \quad (2.8)$$

Em que,

$p_{0,j}$: probabilidade de não existir fila de espera no movimento j , assumindo a existência de uma via exclusiva para a viragem à esquerda da rua principal;

j : 1 ou 4 (movimentos de viragem à esquerda da rua principal);

$i1$: 2 ou 5 (movimentos de atravessamento na rua principal);

$i2$: 3 ou 6 (movimentos de viragem à direita da rua principal);

$x_{i,1+2}$: soma dos graus de saturação, dos movimentos de atravessamento na rua principal e de viragem à direita da rua principal;

s_{i1} : débito de saturação dos movimentos de atravessamento (por defeito utiliza-se o valor de 1800 veículos/hora);

s_{i2} : débito de saturação dos movimentos de viragem à direita (por defeito utiliza-se o valor de 1500 veículos/hora);

v_{i1} : débito do movimento de atravessamento da rua principal;

v_{i2} : débito do movimento de viragem à esquerda da rua principal (se existir uma via destinada exclusivamente a este movimento, tomar $v_{i2} = 0$);

n_L : número de lugares na via de “stockagem”.

Se o movimento em estudo for um movimento 1, assume-se que $i1$ corresponde ao movimento 2 e $i2$ corresponde ao movimento 3. Da mesma maneira no estudo do movimento 4 vem que $i1$ corresponde ao movimento 5 e $i2$ corresponde ao movimento 6.

No caso de haver uma via partilhada ($n_L = 0$), a equação a utilizar será a equação 2.9.

$$p_{0,j}^* = 1 - \frac{1 - p_{0,j}}{1 - x_{i,1+2}} \quad (2.9)$$

2.7.3. MOVIMENTOS DE NÍVEL 3

Os movimentos de nível 3 (atravessamento na rua secundária em intersecções de quatro ramos e viragens à esquerda da rua secundária em intersecções de 3 ramos) devem ceder passagem a todos os movimentos de nível hierárquico superior. Assim sendo é necessário multiplicar as probabilidades desses mesmos movimentos não formarem filas de espera. Neste caso, o fator de impedância é calculado segundo a equação 2.10.

$$f_k = \prod_j p_{0,j} \quad (2.10)$$

A capacidade real dos movimentos de nível 3 é calculada com base na equação 2.11

$$C_{m,k} = f_k * C_{p,k} \quad (2.11)$$

No caso de a intersecção permitir que os movimentos se realizem em duas fases distintas, o método de cálculo é diferente. Assim, será necessário calcular uma novo fator de ajuste, a , e uma variável intermédia, y sendo

$$a = 1 - 0.32e^{-1.3\sqrt{n_m}}, \text{ se } n_m > 0 \quad (2.12)$$

$$y = \frac{c_I - c_{m,x}}{c_{II} - v_L - c_{m,x}} \quad (2.13)$$

Em que:

n_m : número de lugares de “stockagem” no interior do cruzamento;

c_I : capacidade do movimento relativa à primeira fase;

c_{II} : capacidade do movimento relativa à segunda fase;

v_L : máximo valor entre os débitos v_1 e v_4 ;

$c_{m,x}$: capacidade real do movimento admitindo o movimento em uma fase (calculada previamente).

A capacidade real para os movimentos a duas fases de nível 3 é calculada a partir da expressão 2.14 ou 2.15.

Se $y \neq 1$,

$$c_T = \frac{a}{y^{n_m+1} - 1} [y(y^{n_m} - 1)(c_{II} - v_L) + (y - 1)c_{m,x}] \quad (2.14)$$

Se $y = 1$,

$$c_T = \frac{a}{n_m + 1} [n_m(c_{II} - v_L) + c_{m,x}] \quad (2.15)$$

2.7.4. MOVIMENTOS DE NÍVEL 4

Como referido anteriormente, os movimentos de nível 4 apenas ocorrem em intersecções de quatro ramos, e são os movimentos de nível hierárquico inferior, ou seja, têm de ceder passagem a todos os outros movimentos antes de poderem avançar.

Tal como nos movimentos de nível 3, o método de cálculo das capacidades reais dos movimentos de nível 4 difere consoante o tipo da intersecção. Ou seja, se o movimento se realiza em uma ou em duas fases.

No caso de se tratar de uma intersecção em que os movimentos se efetuem em apenas uma fase o método de cálculo é o seguinte:

Inicialmente é necessário calcular a probabilidade de os movimentos de nível hierárquico superior se realizarem sem haver filas de espera. No entanto, estas probabilidades não são independentes. Por exemplo, o facto de haver fila de espera nos movimentos de viragem à esquerda da rua principal afeta a probabilidade de haver fila de espera no movimento de atravessamento na via secundária. Assim, multiplicando o valor das probabilidades iria sobrestimar os efeitos da impedância nos movimentos de nível 4. Por este motivo é calculado um fator de ajuste (p') (equação 2.16).

$$p' = 0.65p'' - \frac{p''}{p'' + 3} + 0.6\sqrt{p''} \quad (2.16)$$

Em que,

p' : ajuste do fator de impedância

p'' : $(p_{0,j})(p_{0,k})$, ver equação 2.17 ou 2.18;

$p_{0,j}$: probabilidade de não haver fila de espera no movimento de viragem à esquerda da via principal;

$p_{0,k}$: probabilidade de não haver fila de espera no movimento de viragem à direita da via secundária.

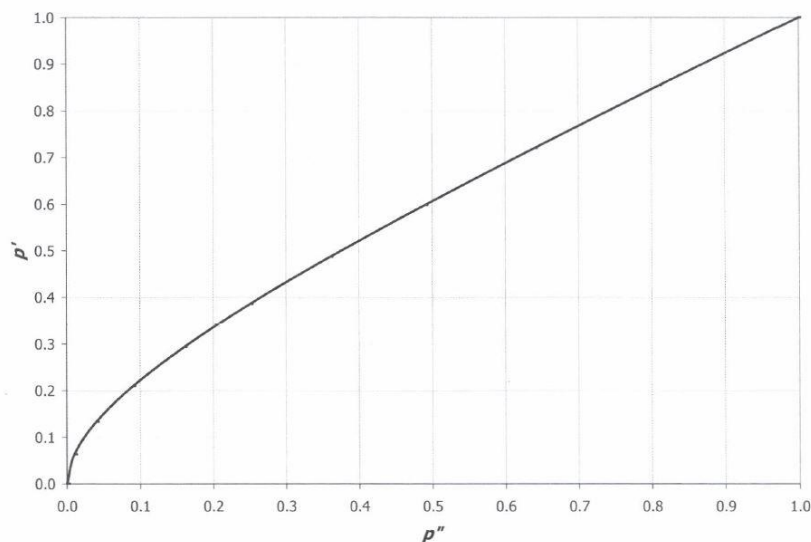
Na determinação do p' para o movimento 7,

$$p'' = (p_{0,1})(p_{0,4})(p_{0,11}) \quad (2.17)$$

Na determinação do p' para o movimento 10,

$$p'' = (p_{0,1})(p_{0,4})(p_{0,8}) \quad (2.18)$$

O gráfico seguinte pode ser usado como alternativa na determinação do p'

Figura 2.4. Relação entre p' e p''

O fator de ajuste da capacidade dos movimentos de nível 4 é então o resultado da equação 2.19.

$$f_{p,l} = (p')(p_{0,j}) \quad (2.19)$$

Em que,

l : viragem à esquerda da rua secundária (movimentos 7 ou 10);

j : movimento conflituante de nível hierárquico 2 (movimento 9 ou 12).

Finalmente, o valor da capacidade real dos movimentos de nível 4 em apenas uma fase é calculado a partir da equação 2.20

$$c_{m,l} = (c_{p,l})f_{p,l} \quad (2.20)$$

O método para calcular a capacidade real de movimentos de nível 4 em intersecções que permitam os movimentos em duas fases é o seguinte:

Primeiramente é necessário calcular um fator de ajustamento, a , e uma variável intermédia, y , através das equações 2.21 e 2.22

$$a = 1 - 0.32e^{-1.3\sqrt{n_m}}, \text{ se } n_m > 0 \quad (2.21)$$

$$y = \frac{c_I - c_{m,x}}{c_{II} - v_L - c_{m,x}} \quad (2.22)$$

Em que:

n_m : número de lugares de “stockagem”;

c_I : capacidade potencial na fase 1;

c_{II} : capacidade potencial na fase 2;

v_L : máximo entre o valor dos débitos dos movimentos 1 e 4;

$c_{m,x}$: capacidade real do movimento, calculada previamente, admitindo apenas uma fase.

O valor da capacidade real vem então da equação 2.23 ou 2.24

Se $y \neq 1$,

$$c_T = \frac{a}{y^{n_m+1} - 1} [y(y^{n_m} - 1)(c_{II} - v_L) + (y - 1)c_{m,x}] \quad (2.23)$$

Se $y = 1$,

$$c_T = \frac{a}{n_m + 1} [n_m(c_{II} - v_L) + c_{m,x}] \quad (2.24)$$

2.8. VIAS PARTILHADAS

Quando vários movimentos partilham a mesma via e não podem esperar a sua vez de avançar parados lado a lado, é necessário ajustar a capacidade da via partilhada. Essa capacidade é dada pela equação 2.25.

$$c_{VP} = \frac{\sum_y v_y}{\sum_y \left(\frac{v_y}{c_{m,y}} \right)} \quad (2.25)$$

Em que,

c_{VP} : capacidade da via partilhada (veículos/hora);

v_y : débito do movimento y na via partilhada (veículos/hora);

$c_{m,y}$: capacidade do movimento y na via partilhada (veículos /hora).

2.9. CÁLCULO DO ATRASO POR MOVIMENTO

Nas intersecções prioritárias, o atraso é definido como o intervalo de tempo total desde que o veículo pára no fim da fila de espera até que arranca para realizar o movimento pretendido. Este tempo inclui o tempo necessário para o veículo percorrer toda a distância entre o início e o fim da fila de espera.

2.9.1. MOVIMENTOS DE NÍVEL 1

Se na rua principal existir uma via partilhada, os veículos que pretendam efetuar a viragem à esquerda podem bloquear os veículos que pretendam efetuar o atravessamento ou a viragem à direita. Este efeito é significativo e pode provocar atrasos nos movimentos de nível 1 e aumentar as filas de espera em todos os movimentos de nível inferior. Observações *in situ* demonstram que este efeito é, geralmente, pequeno pois a rua principal normalmente tem espaço suficiente para que os veículos de nível hierárquico 1 não fiquem bloqueados. Assim, é necessário estimar o número de veículos bloqueados, bem como o seu atraso através da equação 2.26.

$$d_{rank1} = \begin{cases} \frac{(1 - p_{0,j}^*)d_{M,LT} \left(\frac{v_{i,1}}{N} \right)}{v_{i,1} + v_{i,2}} \\ (1 - p_{0,j}^*)d_{M,LT} \end{cases} \quad (2.26)$$

Em que,

d_{rank1} : atraso dos movimentos de nível 1 (segundos);

N : número de vias por sentido na rua principal;

$p_{0,j}^*$: proporção de veículos de nível 1 não bloqueados (ver equação 2.7.);

$d_{M,LT}$: atraso dos veículos que pretendam efetuar a viragem à esquerda da rua principal;

$v_{i,1}$: débito do movimento de atravessamento na via partilhada;

$v_{i,2}$: débito do movimento de viragem na via partilhada.

Numa estrada de vias múltiplas, apenas os débitos na via que pode ficar bloqueada são utilizados para os valores de $v_{i,1}$ e de $v_{i,2}$. Em condições de débitos elevados, assume-se que os veículos bloqueados que não pretendam virar à esquerda, não ultrapassam esses mesmos veículos mudando de via. Assim, vem que $v_{i,1} = v_2/N$.

2.9.2. RESTANTES MOVIMENTOS

O atraso dos movimentos não prioritários está relacionado com a capacidade do movimento e do seu grau de saturação e é calculado através da equação 2.27.

$$d = \frac{3600}{c_{m,x}} + 900T \left[\frac{v_x}{c_{m,x}} - 1 + \sqrt{\left(\frac{v_x}{c_{m,x}} - 1 \right)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{c_{m,x}} \right) \left(\frac{v_x}{c_{m,x}} \right)}{450T}} \right] + 5 \quad (2.27)$$

Em que

d : atraso (segundos);

v_x : débito do movimento x;

$c_{m,x}$: Capacidade do movimento x;

T : período de análise (horas).

2.10. DETERMINAÇÃO DO NÍVEL DE SERVIÇO

O nível de serviço de uma intersecção prioritária é determinado pelo atraso. No entanto, o nível de serviço não é determinado para a intersecção mas sim para cada um dos movimentos não prioritários. No quadro seguinte estão identificados os intervalos do atraso que correspondem a cada nível de serviço.

Quadro 2. 3. Correspondência entre o atraso sentido e o nível de serviço do movimento

Atraso (s)	Nível de serviço
0-10	A
11-15	B
16-25	C
26-35	D
36-50	E
>50	F

2.11. CÁLCULO DOS INDICADORES DE DESEMPENHO

O primeiro indicador de desempenho a ser calculado é o atraso por ramo. Este atraso é uma média ponderada dos atrasos de todos os movimentos que entram numa intersecção através do mesmo ramo e é dado pela equação 2.28.

$$d_A = \frac{d_r v_r + d_t v_t + d_l v_l}{v_r + v_t + v_l} \quad (2.28)$$

Em que

d_A : atraso no ramo de entrada na intersecção;

d_r, d_t, d_l : atrasos dos movimentos de viragem à direita, atravessamento e viragem à esquerda, respetivamente;

v_r, v_t, v_l : débitos dos movimentos de viragem à direita, atravessamento e viragem à esquerda, respetivamente;

Da mesma maneira, é possível calcular o atraso total da intersecção, com base na equação 2.29.

$$d_I = \frac{d_{A,1} v_{A,1} + d_{A,2} v_{A,2} + d_{A,3} v_{A,3} + d_{A,4} v_{A,4}}{v_{A,1} + v_{A,2} + v_{A,3} + v_{A,4}} \quad (2.29)$$

Finalmente, resta apenas calcular o comprimento da fila de espera. Estudos teóricos e observações empíricas demonstram que o comprimento da fila de espera para qualquer movimento não prioritário em intersecções não sinalizadas depende da capacidade do movimento e do volume de tráfego durante o período de análise. O comprimento da fila de espera pode então ser calculado a partir da equação 2.30.

$$Q_{95} = 900T \left[\frac{v_x}{c_{m,x}} - 1 + \sqrt{\left(\frac{v_x}{c_{m,x}} - 1 \right)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{c_{m,x}} \right) \left(\frac{v_x}{c_{m,x}} \right)}{150T}} \right] \left(\frac{c_{m,x}}{3600} \right) \quad (2.30)$$

Em que,

Q_{95} : comprimento da fila de espera (veículos);

v_x : débito do movimento x;

$c_{m,x}$: capacidade real do movimento x;

T : período de análise (horas).

3

CÁLCULO AUTOMÁTICO DOS ATRASOS DOS MOVIMENTOS NÃO PRIORITÁRIOS

3.1. INTRODUÇÃO

O método para a determinação do nível de serviço em intersecções prioritárias é repetitivo, pois é necessário calcular o atraso para cada movimento existente, e trabalhoso, o que acaba por fazer o utilizador perder bastante tempo. Além disso, algumas das fórmulas utilizadas são extensas o que acaba por provocar erros quando o cálculo é realizado manualmente. Assim, era necessária a existência de um programa que tornasse este processo automático, mais simples e menos suscetível a erros. Desta maneira, com a ajuda da ferramenta do Microsoft Excel 2013, foi desenvolvida uma folha de cálculo que permite ao utilizador determinar o nível de serviço de cada movimento não prioritário numa questão de segundos. A ferramenta desenvolvida potencia ainda a aplicação da metodologia do HCM em diferentes situações quer de tráfego quer mesmo de geometria, permitindo testar diferentes soluções.

3.2. DADOS NECESSÁRIOS

Para ser possível determinar o nível de serviço é necessário conhecer à partida alguns dados que estão relacionados com as características da intersecção. Estas características podem ser agrupadas da seguinte forma:

- Geométricas:
 - Número de vias por sentido;
 - Possibilidade de movimentos em 1 ou 2 fases;
 - Existência ou não de vias partilhadas;
 - Número de lugares de espera no interior da intersecção (para movimentos em 2 fases);
 - Inclinação dos ramos de aproximação à intersecção.
- Tráfego:
 - Volume de tráfego de cada movimento (para a hora ou para os 15 minutos mais carregados);
 - Percentagem de veículos pesados;

- Tipos de movimentos possíveis;
- Fator de ponta horário.

No caso de os valores de tráfego registados serem para os 15 minutos mais carregados, basta multiplicar esse valor por 4 para conhecer o volume de ponta. Se o volume registado for para a hora de ponta é então necessário conhecer o fator de ponta horário.

A obtenção destes dados necessita de um estudo prévio da intersecção, pois só com observações realizadas no terreno é possível ao utilizador conhecer completamente a intersecção em estudo e assim preencher todos os campos necessários para a realização do cálculo automático do atraso de cada movimento não prioritário.

3.3. ESTRUTURA DO PROGRAMA DE CÁLCULO AUTOMÁTICO

O programa está dividido por passos, sendo que cada passo corresponde a uma folha de cálculo diferente. Para o utilizador comum, apenas a primeira folha interessa. É nessa folha que são solicitados os dados da intersecção, tanto geométricos como de tráfego, e é também aí que o utilizador fica a conhecer o nível de serviço de cada movimento não prioritário. O organograma seguinte (figura 3.1) sumariza os 9 passos do cálculo automático.

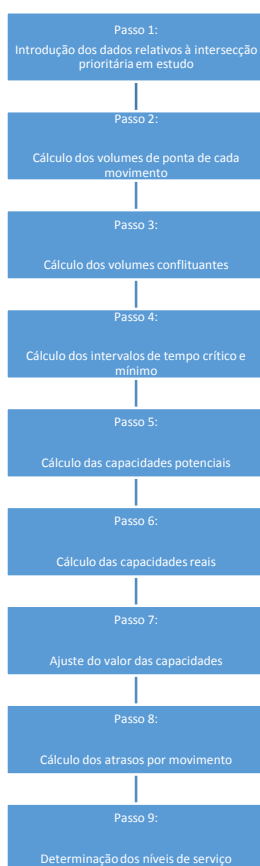
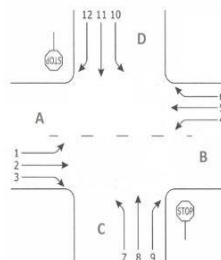


Figura 3.1. Organograma referente aos passos seguidos pelo programa

A utilização do programa é extremamente simples e intuitivo. É apenas necessário preencher determinadas células com as características da intersecção de modo a permitir o processamento de todos os cálculos intermédios. A figura 3.2 apresenta o aspeto inicial do programa.



Movimentos possíveis:

			Volume (veich)	% Pesados	nº fases
1	A-D	Não	0	0	
2	A-B	Não	0	0	
3	A-C	Não	0	0	
4	B-C	Não	0	0	
5	B-A	Não	0	0	
6	B-D	Não	0	0	
7	C-A	Não	0	0	1
8	C-D	Não	0	0	1
9	C-B	Não	0	0	1
10	D-B	Não	0	0	1
11	D-C	Não	0	0	1
12	D-A	Não	0	0	1

A-B: Rua principal

	nº vias	inclinação (%)
Rua A	2	0
Rua B		0

C-D: Rua secundária

	inclinação (%)
Rua C	0
Rua D	0

FPH

	0
--	---

Movimentos

	Movimentos	Vias Partilhadas
Rua C	7, 8	Não
	7, 8, 9 ou 7, 9	Não
	8, 9	Não
Rua D	10, 11	Não
	10, 11, 12 ou 10, 12	Não
	11, 12	Não

"storage places"

A-D	0
B-C	0

Atravessamento em 2 fases

"storage places"	0
------------------	---

Existe via exclusiva destinada às viragens à esquerda na rua principal?

Não

Movimento

	Movimento	NS
Rua A	1	Não aplicável
Rua B	4	Não aplicável
Rua C	7	Não aplicável
	8	Não aplicável
	9	Não aplicável
	7, 8	Não aplicável
	7, 8, 9 ou 7, 9	Não aplicável
	8, 9	Não aplicável
Rua D	10	Não aplicável
	11	Não aplicável
	12	Não aplicável
	10, 11	Não aplicável
	10, 11, 12 ou 10, 12	Não aplicável
	11, 12	Não aplicável

Figura 3.2. Aspeto inicial do programa

O utilizador apenas tem de preencher as células assinaladas a cor laranja com a informação recolhida em campo e o nível de serviço de cada movimento é determinado automaticamente e é transmitido no quadro do canto inferior direito.

No preenchimento dos dados dever-se-á atender:

Na célula em que pede para se especificar o número de vias na rua principal o que se pretende é que o utilizador preencha o campo com o número total de vias (soma do número de vias da rua A com o número de vias da rua B, sem contar com as vias exclusivas destinadas às viragens à esquerda se existirem). Isto deve-se ao facto de a metodologia do HCM 2010 assumir que ambas as ruas têm o mesmo número de vias, e que o número de vias por rua varia entre 1 e 3. Assim, os valores possíveis para o número total de vias é de 2, 4 ou 6.

Nas células referentes às vias partilhadas é importante notar que para cada rua secundária (C ou D) apenas se pode colocar um "Sim". Usando como exemplo uma intersecção prioritária em que na rua secundária todos os movimentos (7, 8 e 9 ou 10, 11 e 12) partilhem uma mesma via, apenas se coloca "Sim" na célula referente aos 3 movimentos deixando as outras células com o "Não". Quer isto dizer que apesar de, neste exemplo, os movimentos 7 e 8 ou 8 e 9 partilharem a mesma via, o que poderia levar o utilizador a colocar um "Sim" na célula respetiva, o facto de serem os três movimentos (7, 8 e 9) a partilhar a via, faz com que se deva colocar um "Não" na célula respetiva à partilha da via por dois movimentos.

Quando existe via exclusiva de viragem à esquerda mas esta tem um comprimento reduzido (via curta), é necessário que o utilizador especifique qual o número máximo de veículos que

podem aguardar na via curta até realizarem o movimento pretendido. O mesmo acontece nos atravessamentos em 2 fases, o utilizador tem de especificar quanto veículos podem esperar no separador central até realizarem o movimento.

Os cálculos intermédios são todos efetuados em folhas de cálculo diferentes os quais serão apresentados no exemplo seguinte.

3.4. EXEMPLO

Com o objetivo de melhor ilustrar o processo de cálculo que foi adotado na ferramenta desenvolvida, apresenta-se o exemplo correspondente à determinação do nível de serviço dos movimentos não prioritários da intersecção representada na figura 3.3.

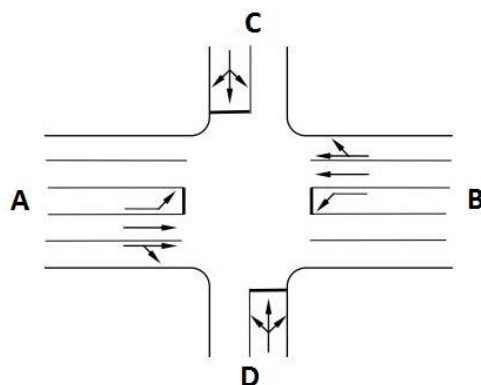


Figura 3.3. Planta da intersecção prioritária que será alvo de estudo

Note-se que todas as imagens a seguir apresentadas foram retiradas do ficheiro Excel que realiza o cálculo automático.

3.3.1. DADOS

Intersecção composta por 4 ramos em que a rua principal dispõe de 2 vias em cada sentido, mais uma via destinada exclusivamente às viragens à esquerda. A rua secundária dispõe de apenas uma via por sentido. Todos os movimentos são possíveis como mostra na figura 3.3. No terreno foi observada uma percentagem de veículos pesados igual a 10%, o terreno é plano e existe um separador central que permite que os movimentos sejam realizados em 2 fases distintas. O espaço de armazenamento do separador é de 2 veículos. Foi admitido um fator de ponta horário de 0,85. Foram ainda registados os volumes de veículos para cada movimento que se encontram na matriz origem/destino representada no quadro 3.1.

Quadro 3.1. Matriz origem/destino da intersecção prioritária

O/D	A	B	C	D
A	-	212	42	28
B	255	-	56	85
C	37	47	-	112
D	24	9	94	-

3.3.2. RESOLUÇÃO

O primeiro, e único, passo é, então, preencher as células a laranja com a informação recolhida como mostra a figura seguinte.

		Volume (veich)	% Pesados	nº fases
1	A-D	28	10	
2	A-B	212	10	
3	A-C	42	10	
4	B-C	56	10	
5	B-A	255	10	
6	B-D	85	10	
7	C-A	37	10	2
8	C-D	112	10	2
9	C-B	47	10	1
10	D-B	9	10	2
11	D-C	94	10	2
12	D-A	24	10	1

	nº vias	inclinação (%)
Rua A	4	0
Rua B		0
Rua C		0
Rua D		0

	inclinação (%)
Rua C	0
Rua D	0

FPH	0,85

	Movimentos	Vias Partilhadas
Rua C	7, 8	Não
	7, 8, 9 ou 7, 9	Sim
	8, 9	Não
Rua D	10, 11	Não
	10, 11, 12 ou 10, 12	Sim
	11, 12	Não

	"storage places"
A-D	0
B-C	0

Atravessamento em 2 fases	
"storage places"	0
	2

Existe via exclusiva destinada às viragens à esquerda na rua principal?	
	Não

Figura 3.4. Aspeto do programa depois de inseridos os dados do problema

Automaticamente, o programa calcula todos os passos intermédios até chegar ao nível de serviço de cada movimento. Primeiramente calcula os volumes de ponta de cada movimento como se pode ver na figura 3.5.

Movimento	Volume de ponta (veic/h)
v1	33
v2	249
v3	49
v4	66
v5	300
v6	100
v7	44
v8	132
v9	55
v10	11
v11	111
v12	28

Figura 3.5. Volumes de ponta para cada movimento (Passo 2)

O passo seguinte do cálculo automático do atraso de cada movimento é a determinação dos volumes conflituantes associados a cada movimento. É importante notar que estes volumes são calculados para as diferentes situações possíveis. Quer isto dizer que são calculados os volumes conflituantes para as intersecções com 1, 2 ou 3 vias por sentido e para os movimentos em uma ou duas fases. Apenas no final, na determinação do nível de serviço se tem em consideração estas características da intersecção. Assim, como mostra a figura seguinte, apresentam-se os volumes conflituantes para todos os movimentos. Note-se que para os movimentos de nível hierárquico 1 os volumes conflituantes são iguais aos volumes de partida de cada movimento.

Movimento	2 vias	4 vias	6 vias
v1	400	400	400
v2	249	249	249
v3	49	49	49
v4	298	298	298
v5	300	300	300
v6	100	100	100
v9	273,5	149	149
v12	350	200	200

	2fases		
	1 fase	1ª fase	2ª fase
v8	871,5	339,5	532
v11	846	456,5	364

	2 vias			4 vias			6 vias		
	1 fase	2 fases		1 fase	2 fases		1 fase	2 fases	
		1ª fase	2ª fase		1ª fase	2ª fase		1ª fase	2ª fase
v7	891	339,5	551,5	677	339,5	337,5	647	339,5	307,5
v10	915	482	433	738,5	482	256,5	713,6	482	231,6

Figura 3.6. Volumes conflituantes para cada movimento (Passo 3)

De seguida, é necessário calcular o intervalo crítico e o intervalo mínimo para cada movimento. Mais uma vez, são calculados os valores dos dois intervalos para todas as características possíveis do cruzamento como é exemplificado nas figuras 3.7 e 3.8.

1 fase		
	tc, base	ti, mínimo
v1	4,1	2,2
v4	4,1	2,2
v7	7,5	3,5
v8	6,5	4
v9	6,9	3,3
v10	7,5	3,5
v11	6,5	4
v12	6,9	3,3

1 fase		
	tc	ti
t1	4,3	2,3
t4	4,3	2,3
t7	7,7	3,6
t8	6,7	4,1
t9	7,1	3,4
t10	7,7	3,6
t11	6,7	4,1
t12	7,1	3,4

Figura 3.7. Valores dos intervalos crítico e mínimo para movimentos apenas numa fase

2 fases				
		tc, base	tc	tc, tot
t7	1ª fase	5,5	5,7	11,4
	2ª fase	5,5	5,7	
t8	1ª fase	6,5	6,7	13,4
	2ª fase	6,5	6,7	
t10	1ª fase	5,5	5,7	11,4
	2ª fase	5,5	5,7	
t11	1ª fase	6,5	6,7	13,4
	2ª fase	6,5	6,7	

Figura 3.8. Valores dos intervalos crítico e mínimo para movimentos em 2 fases

O passo seguinte do cálculo automático é então calcular as capacidades potenciais de cada movimento. Como referido anteriormente a capacidade potencial representa, para certas condições de circulação, o número máximo de veículos que podem realizar o movimento pretendido por unidade de tempo. Os valores das capacidades potenciais são apresentados na figura 3.9.

Só para uma fase		Para duas fases			
		1ª fase		2ª fase	
	Cp,x		Cp,x		Cp,x
Cp,1	1099,99	Cp,1	1099,99	Cp,1	1099,99
Cp,4	1204,14	Cp,4	1204,14	Cp,4	1204,14
Cp,7	323,50	Cp,7	688,95	Cp,7	690,48
Cp,8	273,50	Cp,8	562,82	Cp,8	434,97
Cp,9	846,06	Cp,9	846,06	Cp,9	846,06
Cp,10	291,43	Cp,10	587,53	Cp,10	755,32
Cp,11	283,32	Cp,11	481,46	Cp,11	544,78
Cp,12	783,23	Cp,12	783,23	Cp,12	783,23

Figura 3.9. Valores das capacidades potenciais por movimento

Tal como nos passos anteriores, também foi calculado o valor da capacidade potencial para as duas situações possíveis (movimentos em uma ou em duas fases). É possível observar que os únicos movimentos em que a capacidade potencial difere se o movimento se realizar em duas fases são o 7, o 8, o 10 e o 11.

A capacidade real de um movimento é obtida a partir da capacidade potencial, corrigida por um fator de ajustamento. Este fator deve-se ao facto de nem todos os intervalos de tempo, que seriam teoricamente aceitáveis, serem aproveitados pelos condutores não prioritários. Para o cálculo da capacidade real, o programa começa por calcular a probabilidade do movimento de nível hierárquico superior não formar fila de espera (equação 2.6). Esses valores são apresentados na figura 3.10.

	p _{0,i}
1	0,970
4	0,945
7	0,864
8	0,517
9	0,935
10	0,962
11	0,608
12	0,964

Figura 3.10. Probabilidades de os movimentos de nível hierárquico superior não formarem fila de espera

Nesta fase é importante diferenciar os movimentos por nível de prioridade pois o cálculo da capacidade real é realizado de forma diferente para cada um dos níveis hierárquicos.

Como já foi referido previamente, os movimentos de nível hierárquico 2 só são obrigados a ceder passagem aos movimentos prioritários, assim, são os primeiros a avançar assim que haja um intervalo de tempo aceitável na corrente de tráfego principal. Para estes movimentos o fator de impedância é igual a 1 e a capacidade real igual à potencial. Contudo, se não existir uma via exclusiva para os movimentos de viragem à esquerda da rua principal, é necessário calcular a probabilidade de não existir fila de espera na via partilhada (equações 2.7 e 2.8). Se existir via exclusiva destinada às viragens à esquerda da rua principal mas esta tiver um comprimento reduzido a equação a utilizar será a 2.9. Neste exemplo, existe

uma via exclusiva de viragens à esquerda, assim o fator de impedância para os movimentos de nível 2 (movimentos 1 e 4) é igual a 1 e a capacidade real igual à potencial.

No caso dos movimentos de nível hierárquico 3 (movimentos 8 e 11), neste exemplo, os movimentos são realizados em duas fases distintas. Deste modo é necessário calcular um novo fator de ajuste, a (equação 2.12), e uma variável intermédia, y (equação 2.13).

mov.	a	y
8	0,949	2,6
11	0,949	1,0

Figura 3.11. Valores do fator de ajuste e da variável intermédia para os movimentos de nível 3

Depois de calculados estes dois parâmetros para estes 2 movimentos e através das equações 2.14 ou 2.15, obtém-se a capacidade real como indica a figura 3.12.

	Cap. Real
Cm,8	339,616
Cm,11	385,959

Figura 3.12. Valores da capacidade real dos movimentos de nível 3

Tal como para os movimentos de nível 3, também nos movimentos de nível 4 nos movimentos realizados em duas fases é necessário calcular um fator de ajuste, a (equação 2.21), e uma variável intermédia, y (equação 2.22).

mov.	a	y
7	0,949	2,2
10	0,949	0,8

Figura 3.13. Valores do fator de ajuste e da variável intermédia para os movimentos de nível 4

Com base nas equações 2.23 e 2.24 calcula-se então a capacidade real para estes dois movimentos, como é apresentado na figura 3.14.

	Cap. Real
Cm,7	478,111
Cm,10	449,841

Figura 3.14. Valores da capacidade real dos movimentos de nível 4

Concluídos todos os passos intermédios chega-se a todos os valores da capacidade real para esta intersecção prioritária como mostra a figura 3.15.

	Cap real
Cm,1	1099,99
Cm,4	1204,14
Cm,7	200,537
Cm,8	250,753
Cm,9	846,059
Cm,10	156,82
Cm,11	259,754
Cm,12	783,231

Figura 3.15. Valores da capacidade real de cada movimento

De seguida, o programa tem em conta a existência, ou não, de vias partilhadas na intersecção prioritária. Se não existirem vias partilhadas o programa automaticamente passa este passo à frente, mantendo os valores das capacidades reais de cada movimento. Se existirem vias partilhadas, como é o caso deste exemplo, o programa vai ajustar o valor das capacidades reais dos movimentos inseridos na via partilhada de acordo com a equação 2.25. A figura 3.16 representa o valor da capacidade das vias partilhadas (veíc/h).

1 fase				2 fases			
	Movimentos	Cm, partilhadas	v		Movimentos	Cm, partilhadas	v
Rua C	7,8	0,00	176	Rua C	7,8	0,00	176
	7,8,9	284,89	231		7,8,9	423,14	231
	8,9	0,00	187		8,9	0,00	187
Rua D	10,11	0,00	122	Rua D	10,11	0,00	122
	10,11,12	281,31	150		10,11,12	431,23	150
	11,12	0,00	139		11,12	0,00	139

Figura 3.16. Valores da capacidade das vias partilhadas calculados quer para 1 quer para 2 fases

O último passo do método automático de cálculo dos atrasos é, precisamente, o cálculo do atraso de cada movimento não prioritário. Neste exemplo, o facto de existir uma via exclusiva para viragens à esquerda na rua principal possibilita que a fila de espera dos veículos que permitam realizar esse movimento não bloqueie os veículos prioritários. Logo, os veículos de nível hierárquico 1 não sofrem atraso. Para os veículos não prioritários o atraso é calculado segundo a equação 2.27. Na via principal, apenas os movimentos 1 e 4 (movimentos de viragem à esquerda) é que sofrem atraso.

	Atraso por movimento
d1	8,37
d4	8,16

Figura 3.17. Atraso dos movimentos da rua principal

Na rua secundária, os movimentos partilham todos a mesma via, pelo que o atraso será calculado para essa via, e não por movimento. Os valores dos atrasos da rua secundária encontram-se na figura seguinte.

	Movimentos	Atraso Vias Part
Rua C	7,8	0,00
	7,8,9	23,27
	8,9	0,00
Rua D	10,11	0,00
	10,11,12	17,74
	11,12	0,00

Figura 3.18. Atraso dos movimentos da rua secundária

Finalmente, na página inicial do programa, aparecem os níveis de serviço correspondentes aos movimentos.

	Movimento	NS
Rua A	1	A
Rua B	4	A
Rua C	7	Não aplicável
	8	Não aplicável
	9	Não aplicável
	7, 8	Não aplicável
	7, 8, 9 ou 7, 9	C
	8, 9	Não aplicável
Rua D	10	Não aplicável
	11	Não aplicável
	12	Não aplicável
	10, 11	Não aplicável
	10, 11, 12 ou 10, 12	C
	11,12	Não aplicável

Figura 3.19. Níveis de serviço

4

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE PARÂMETROS BASE

4.1. INTRODUÇÃO

O programa desenvolvido permite o cálculo automático dos atrasos dos movimentos não prioritários, sendo possível analisar diferentes tipos de intersecções prioritárias, tanto ao nível geométrico como também ao nível do tráfego. A facilidade da utilização do programa permite que se alterem as características da intersecção com alguma rapidez. Foi, então, possível, com base nos vários casos estudados perceber a importância de determinados parâmetros na determinação do nível de serviço de cada movimento numa intersecção prioritária. Assim, para as intersecções de três e quatro ramos, foram analisados quer a influência da variação dos volumes de tráfego bem como a influência de alguns parâmetros base adotados no HCM, tais como o tempo crítico base e o intervalo mínimo de base. Note-se que estes valores foram considerados no HCM com base na realidade norte-americana sendo relevante estudar a sua adoção em Portugal. Este estudo obrigaria a uma ampla recolha de dados, não enquadrável no âmbito deste trabalho. Assim, optou-se por averiguar o reflexo no atraso causado por variações nos valores propostos no HCM. Foi ainda analisada a influência da percentagem de veículos pesados bem como o atravessamento em duas fases.

4.2. INTERSECÇÕES PRIORITÁRIAS COMPOSTAS POR 3 RAMOS (ENTRONCAMENTOS)

4.2.1. VIA EXCLUSIVA DESTINADA ÀS VIRAGENS À ESQUERDA

Primeiramente optou-se por verificar o peso da existência ou não de uma via exclusiva destinada às viragens à esquerda na rua principal na determinação do nível de serviço dos movimentos não prioritários. A figura seguinte (Fig. 4.1) apresenta os volumes de tráfego iniciais do estudo deste caso.

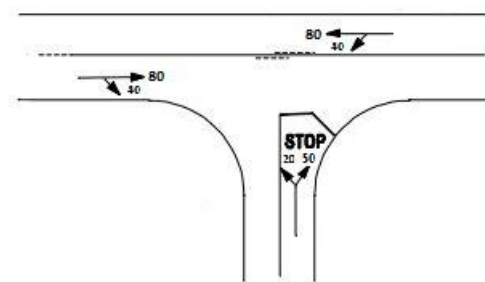


Figura 4.1. Volumes iniciais utilizados no caso de estudo 4.2.1

O método seguido nesta situação foi aplicar incrementos de 25% nos volumes de tráfego da via principal até se atingir o volume de 1148 veículos/hora (aproximadamente igual ao limite superior do nível de serviço C), sendo que a partir desse momento os incrementos foram de apenas 10%. Note-se que se mantiveram sempre inalterados os volumes da via secundária. De seguida registavam-se os valores dos atrasos para a rua secundária quando existe e quando não existe via exclusiva destinada às viragens à esquerda.

Assim, depois de calculados os atrasos para cada situação, foi possível construir um gráfico (Fig. 4.2) que demonstra as diferenças sentidas pelos condutores.

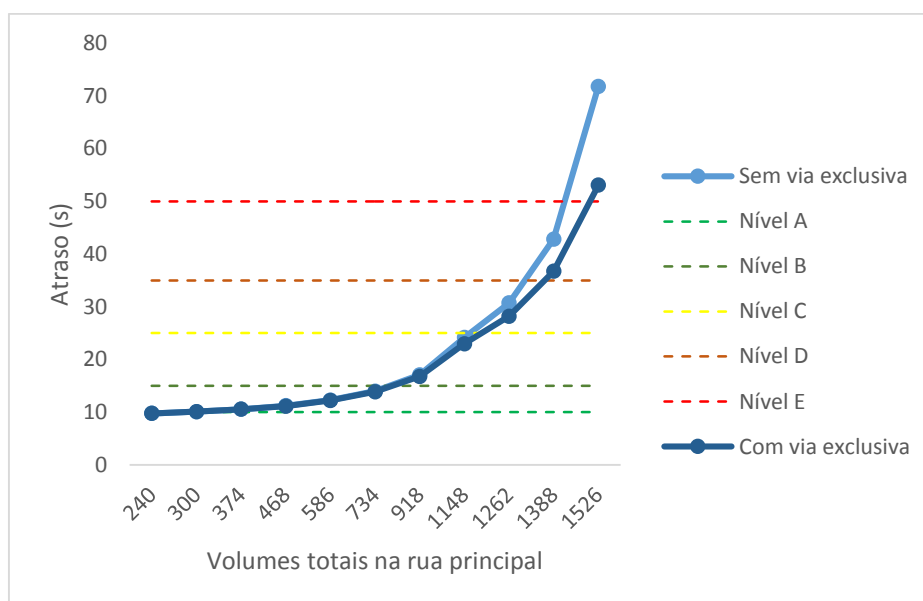


Figura 4.2. Atraso em função do volume de tráfego na rua principal

Pela observação do gráfico pode-se concluir que apenas para intersecções prioritárias com volumes de tráfego na ordem dos 1262 veículos/hora na rua principal (em ambos os sentidos) se observam diferenças significativas nos atrasos da rua secundária. Até ao valor de 918 veículos/hora, a diferença do atraso sentido é inferior a 0,5 segundos, enquanto para um volume de tráfego na ordem dos 1500 veículos/hora, a diferença é já de aproximadamente de 20 segundos.

Para confirmar os resultados obtidos optou-se por inverter o método. Quer isto dizer que foram escolhidos novos volumes de tráfego para as duas ruas e que se optou por ir alterando os volumes da rua secundária, mantendo os da rua principal. Os volumes iniciais apresentam-se na figura 4.3.

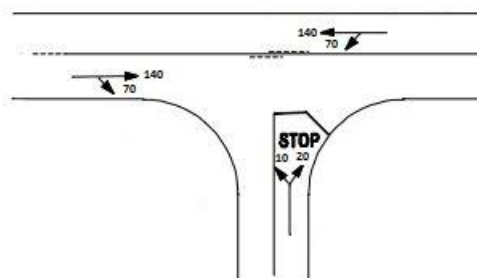


Figura 4.3. Volumes iniciais utilizados no caso de estudo 4.2.1

Com base nestes volumes iniciais e aumentando gradualmente o valor dos volumes de tráfego da rua secundária, com a ajuda do programa desenvolvido foi possível calcular os valores dos atrasos da rua secundária quando existe e quando não existe na rua principal uma via destinada unicamente às viragens à esquerda. Com esses valores foi possível construir o gráfico seguinte (Fig. 4.4).

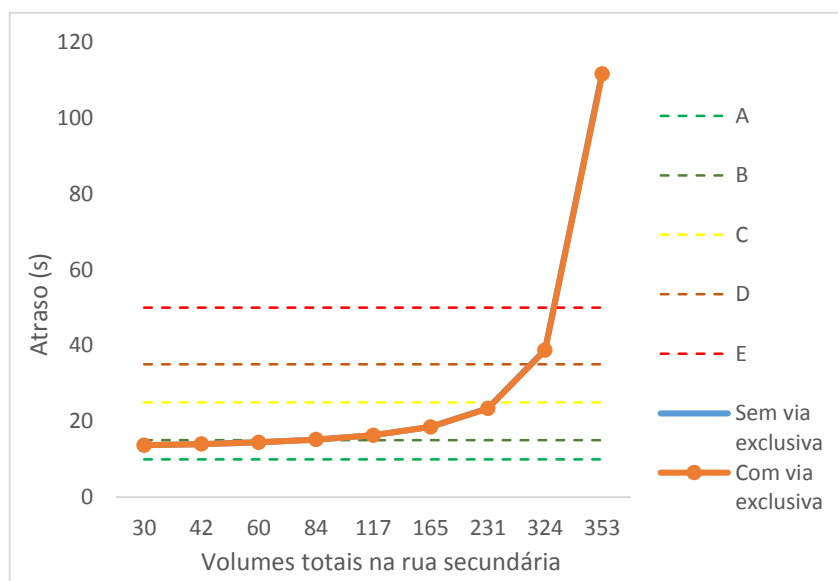


Figura 4.4. Atraso em função do volume de tráfego na rua secundária

Como se pode observar pelo gráfico, não há qualquer diferença nos atrasos da rua secundária já que as duas curvas são coincidentes para todos os volumes considerados.

Como seria de esperar, para estas duas situações, as diferenças entre haver ou não uma via exclusiva destinada às viragens à esquerda na rua principal são praticamente nulas visto que esta via influencia sobretudo o atraso dos movimentos de atravessamento na rua principal. Caso não exista uma via que

apenas permita as viragens à esquerda, os veículos que pretendem realizar o atravessamento na rua principal poderão ficar bloqueados pelos veículos que pretendam virar à esquerda que, por serem de nível hierárquico 2, poderão sofrer algum atraso. O mesmo pode acontecer se existir uma via destinada às viragens à esquerda mas que não tenha o comprimento suficiente para acomodar todos os veículos que esperam para realizar esse movimento, impedindo assim os veículos que queiram ir em frente de avançar. Se existir uma via com comprimento suficiente para que os veículos que pretendam virar à esquerda não impeçam os movimentos de nível hierárquico 1 de avançar, estes não sofrem qualquer tipo de atraso.

Assim, para verdadeiramente perceber a influência da existência ou não de uma via destinada exclusivamente às viragens à esquerda na rua principal, e com a ajuda do programa desenvolvido, foi calculado o atraso dos movimentos de nível hierárquico 1 para vários volumes de tráfego na rua principal quando não existe via para as viragens à esquerda, já que, como explicado anteriormente, quando existe via para as viragens à esquerda, os movimentos de atravessamento na rua principal não sofrem atraso. Depois de vários testes realizados, foi possível chegar à conclusão que para o volume de tráfego máximo utilizado nos exemplos anteriores (superior a 1500 veículos/hora), o valor do atraso é inferior a 9 segundos, o que significa que os movimentos de nível 1 apresentam sempre o nível de serviço A.

4.2.2. TEMPO CRÍTICO BASE

O segundo parâmetro a ser estudado foi o tempo crítico base. O facto de estes tempos serem definidos tendo como base observações nos Estados Unidos da América, faz com que seja importante perceber qual o peso, no valor do atraso final, que este parâmetro tem, pois os hábitos dos condutores diferem bastante dos condutores europeus. Assim, tendo em conta o valor base do tempo crítico e fazendo variar este tempo (entre -15% e +15%) para quatro situações de volumes de tráfego (correspondendo cada uma aos níveis de serviço mais usuais, níveis B, C, D e E) foi possível construir os 4 gráficos seguintes (figura 4.5). Os volumes de tráfego na rua principal utilizados para cada um dos níveis de serviço foram os seguintes:

- Nível B: 586 veículos/hora;
- Nível C: 1062 veículos/hora;
- Nível D: 1294 veículos/hora;
- Nível E: 1436 veículos/hora.

Estes volumes de tráfego foram escolhidos seguindo dois critérios. Um dos critérios utilizado foi que se mantivesse sempre a repartição dos volumes de tráfego, ou seja, o movimento de atravessamento tem, aproximadamente, o dobro de veículos do outro movimento possível na via (viragem à direita ou à esquerda). O outro critério utilizado, foi escolher um volume de tráfego que se traduzisse no atraso médio do nível de serviço correspondente.

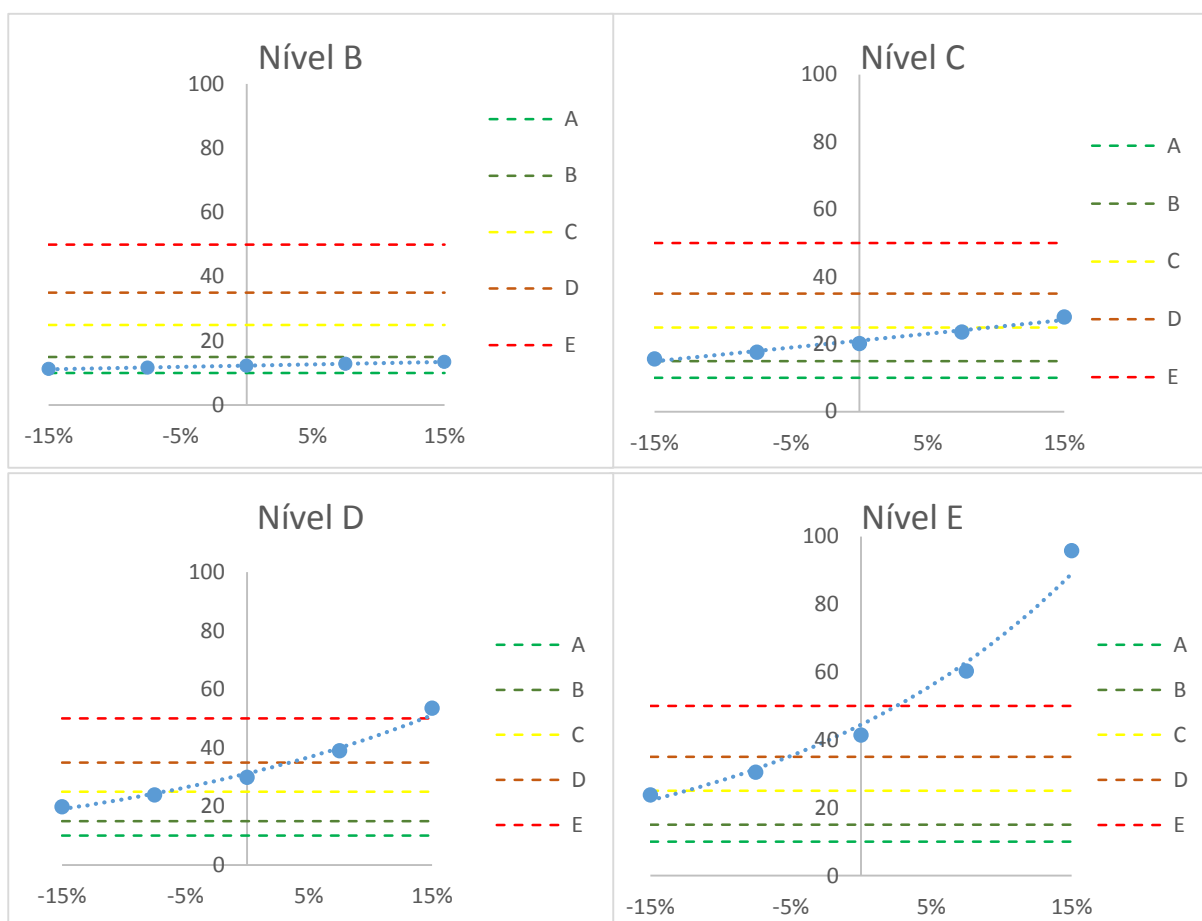


Figura 4.5. Variação do atraso com o tempo crítico base

Como se pode observar nos 4 gráficos a variação do tempo crítico base só tem influência no valor final do atraso em intersecções prioritárias com nível de serviço D ou E. Nestes casos, uma variação de -15% (que pode variar entre um mínimo de 0,6 segundo e um máximo 1 segundo, dependendo do movimento) pode significar uma redução de 50% do atraso sentido pelos veículos não prioritários e consequentemente a redução de 1 ou 2 níveis de serviço. Do mesmo modo, um aumento de 15% do tempo crítico base resulta numa agravamento significativo no nível de serviço da intersecção prioritária em estudo.

4.2.3. INTERVALO MÍNIMO DE BASE

O outro parâmetro estudado em intersecções prioritárias compostas por 3 ramos foi o intervalo mínimo base. O processo utilizado para se perceber a verdadeira importância deste parâmetro no valor final do atraso de uma intersecção prioritária foi semelhante ao utilizado no estudo do tempo crítico base. Quer isto dizer que inicialmente foram definidas quatro situações de volumes de tráfego diferentes, correspondendo cada uma delas aos níveis de serviço B, C, D e E, tendo sido calculados os atrasos para cada uma das situações. De seguida, alterou-se o intervalo mínimo de base (variação entre -15% e +15%) e registaram-se também, os atrasos sentidos na via secundária. Estes valores permitiram a construção dos gráficos seguintes (figura 4.6) que ajudam a compreender o peso do intervalo mínimo de base no valor final do atraso.

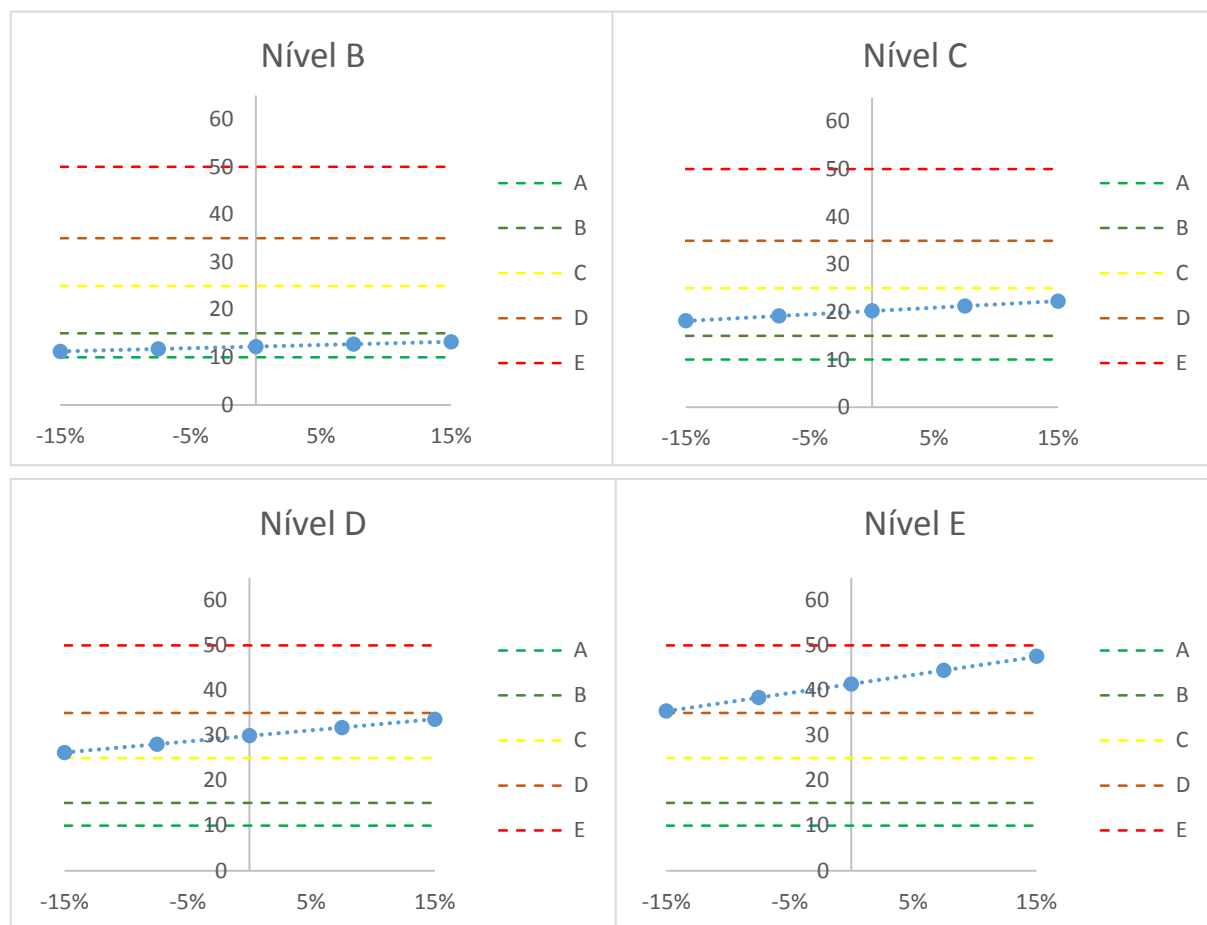


Figura 4.6. Variação do atraso com o intervalo mínimo de base

Pela observação dos gráficos facilmente se percebe que o intervalo mínimo de base é um parâmetro com pouca expressão no método de cálculo para a determinação dos atrasos dos movimentos não prioritários. Pode-se constatar que, apesar das variações de -15% ou de +15% (o que equivale a uma variação entre um mínimo de 0,3 segundo e um máximo de 0,5 segundo), para as quatro situações apresentadas, o nível de serviço da intersecção prioritária permanece inalterado.

4.3. INTERSECÇÕES PRIORITÁRIAS COMPOSTAS POR 4 RAMOS

4.3.1. VIA EXCLUSIVA DESTINADA ÀS VIRAGENS À ESQUERDA

Tal como nas intersecções prioritárias compostas por 3 ramos, também aqui o primeiro parâmetro a ser estudado foi a existência, ou não, de uma via exclusiva para as viragens à esquerda na rua principal. Para esse estudo foi necessário definir como se procederia para avaliar o peso da existência de uma via exclusiva destinada unicamente às viragens à esquerda. Assim, foram definidos volumes de tráfego para todos os movimentos existentes como mostra a figura 4.7.

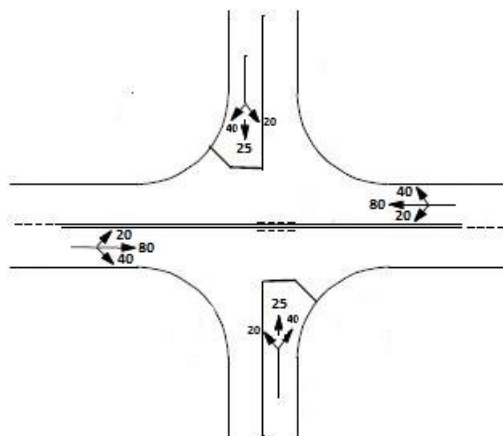


Figura 4.7. Volumes iniciais utilizados no caso de estudo 4.3.1

Com base nos volumes apresentados na figura 4.7, calcularam-se os atrasos nas ruas secundárias, atraso esse que é igual em ambas as ruas pois os volumes de tráfego são também iguais. De seguida foram aumentados os volumes dos movimentos da via principal com incrementos de 20%, mantendo inalterados os volumes da rua secundária calculando sempre os atrasos dos movimentos não prioritários, quer existisse uma via exclusiva destinada às viragens à esquerda ou não. Esses valores dos atrasos permitiram depois, a construção do gráfico seguinte (Fig. 4.8).

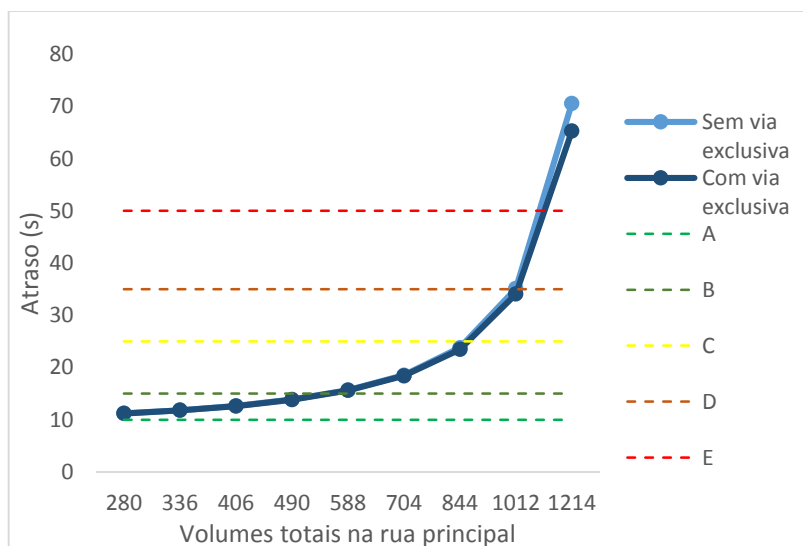


Figura 4.8. Atraso em função do volume de tráfego na rua principal

Pela observação do gráfico nota-se facilmente que em intersecções prioritárias compostas por 4 ramos, a existência de uma via exclusiva destinada às viragens à esquerda na rua principal não tem influência praticamente nenhuma no atraso sentido pelos condutores não prioritários. Apenas no último registo, correspondente ao nível de serviço F, e em que os volumes de tráfego apresentados já ultrapassam os

1000 veículos por hora se regista uma diferença de cerca de 5 segundos (que apenas corresponde a menos de 10% do atraso máximo).

Depois de realizado o estudo do impacte da existência de vias exclusivas destinadas às viragens à esquerda da rua principal, tendo por base apenas a alteração dos volumes de tráfego da rua principal, foi realizado um estudo semelhante sendo que desta vez optou-se por manter os volumes de tráfego da rua principal inalterados e ir alterando os volumes da rua secundária. A figura seguinte demonstra os volumes iniciais para cada uma das duas ruas.

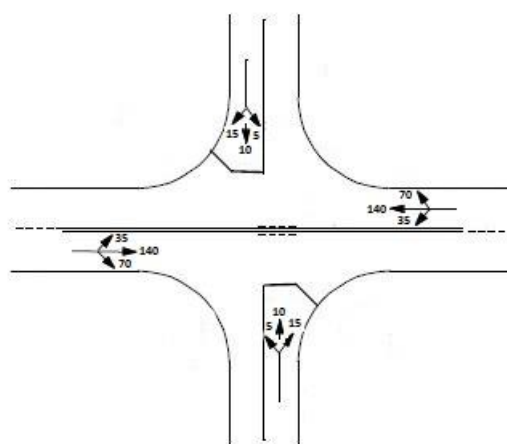


Figura 4.9. Volumes iniciais utilizados no caso de estudo 4.3.1

Como dito anteriormente, o método consistiu em ir alterando apenas os volumes de tráfego da via secundária ao mesmo tempo que se iam calculando os valores dos atrasos para as duas situações em estudo (com e sem via exclusiva). O gráfico seguinte (Fig. 4.10) apresenta as diferenças entre os dois casos.

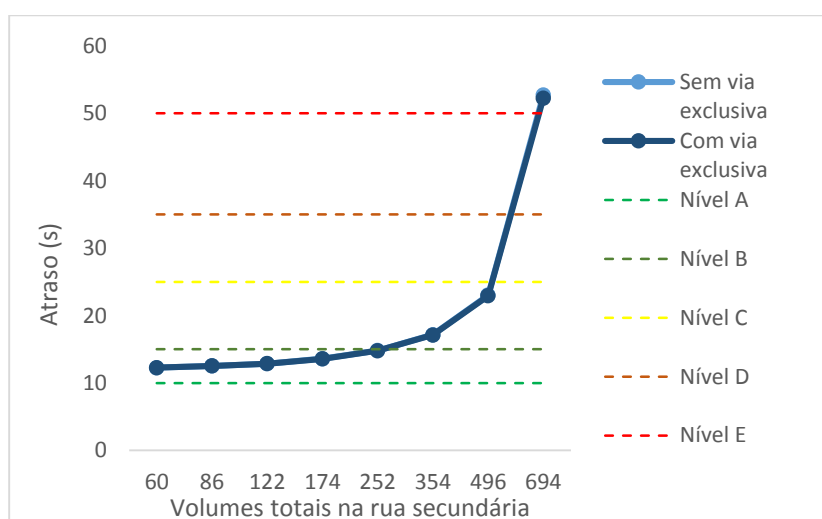


Figura 4.10. Atraso em função dos volumes de tráfego da rua secundária

Como se pode constatar no gráfico (e como era expectável), as diferenças são praticamente nulas. Por exemplo, no último registo, em que os volumes de tráfego da rua secundária até já são superiores aos da rua principal, a diferença entre o atraso sentido com existência de via exclusiva na rua principal para viragens à esquerda e sem via exclusiva é de apenas meio segundo, o que tem um impacte nulo no atraso sentido pelos condutores não prioritários.

Assim, da mesma maneira que foi feito para as intersecções prioritárias compostas por 3 ramos, foram estudados os atrasos correspondentes aos movimentos da rua principal. Para os movimentos de nível 2 (viragens à esquerda), o facto de existir ou não uma via para as viragens à esquerda não influencia o atraso sofrido pelos condutores, o atraso é igual nas duas situações. Se existir uma via que permita apenas as viragens à esquerda, o atraso dos movimentos de nível 1 (atravessamento e viragens à direita) é nulo. Se não existir, ou for de comprimento reduzido, os veículos de nível 1 podem ficar bloqueados pelos veículos de nível hierárquico 2 e poderão sofrer atrasos. Contudo, com a ajuda do programa desenvolvido chegou-se à conclusão que mesmo que os volumes sejam muito elevados, este atraso não é significativo e o nível de serviço correspondente aos movimentos de nível 1 é sempre A.

4.3.2. TEMPO CRÍTICO BASE

Também para intersecções prioritárias compostas por 4 ramos há a necessidade de perceber até que ponto a variação do tempo crítico base influencia o desempenho da intersecção prioritária, isto é, qual a diferença do atraso sentido pelos condutores das ruas secundárias se for alterado o tempo crítico base.

Para isso, foram testados vários valores de volumes de tráfego de modo a serem escolhidas quatro situações referentes aos níveis de serviço B, C, D e E. Os volumes de tráfego utilizados foram os seguintes:

- Nível B: 406 veículos/hora;
- Nível C: 772 veículos/hora;
- Nível D: 968 veículos/hora;
- Nível E: 1090 veículos/hora.

Para estas quatro situações foram alterados os valores do tempo crítico base (variações entre -15% e +15%). Depois de calculados os valores dos atrasos para todas as situações, procedeu-se à construção de quatro gráficos (um para cada nível de serviço) que permitem perceber a importância do tempo crítico base no valor final do atraso. Os gráficos apresentam-se na figura seguinte (figura 4.11).

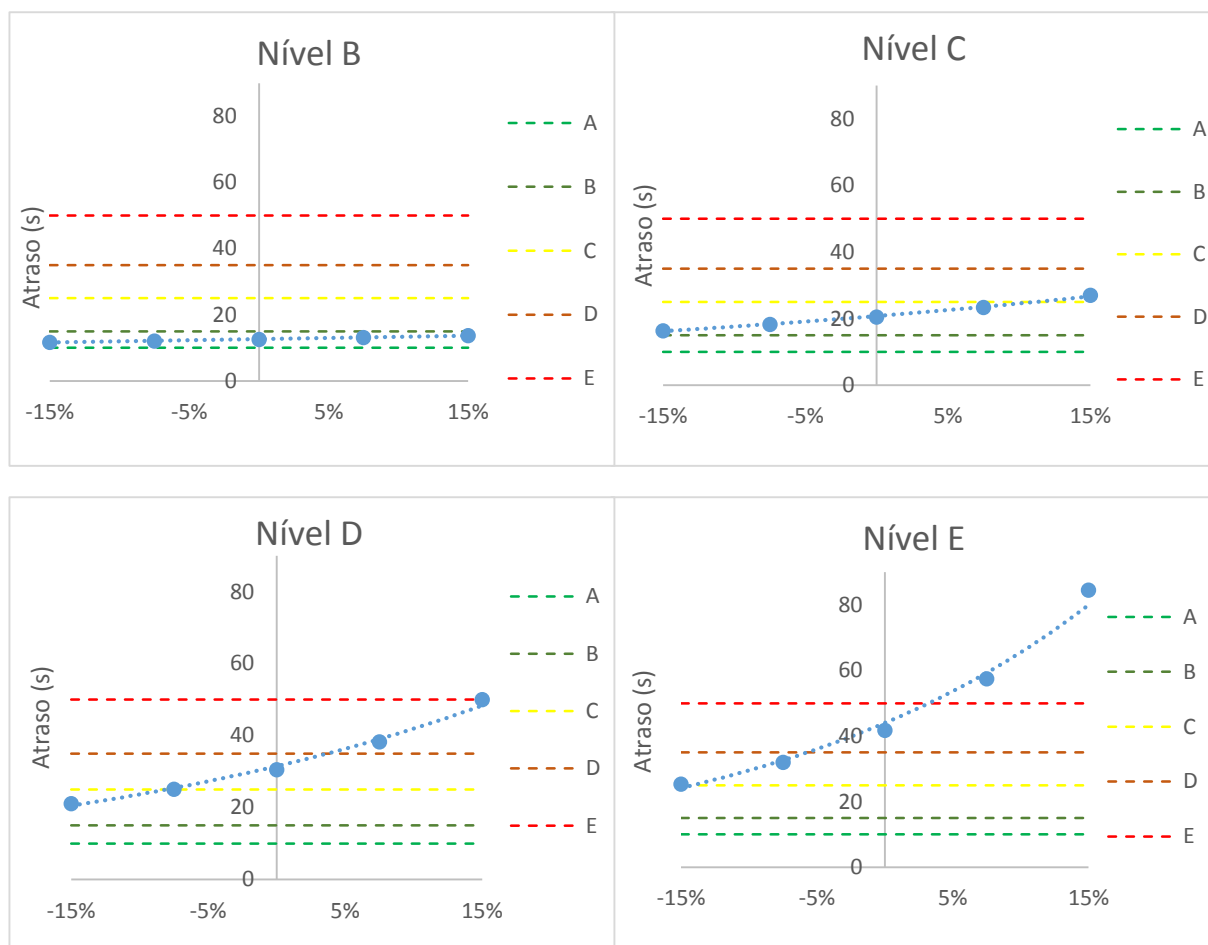


Figura 4.11. Variação do atraso com o tempo crítico base

Os resultados obtidos são em tudo semelhantes aos obtidos para as intersecções prioritárias compostas apenas por 3 ramos. Isto é, apenas para os níveis em que o atraso registado é superior, o tempo crítico base tem uma influência maior. Quer isto dizer que para os atrasos registados para os volumes de tráfego correspondentes aos níveis D e E sofrem grandes variações quando se altera o tempo crítico base. Por exemplo, uma variação de -15% (dependendo do movimento, esta variação corresponde a um valor entre 0,6 segundos e 1 segundo) do tempo crítico base pode levar a um decréscimo de praticamente 50% do atraso sentido pelos condutores das ruas secundárias.

4.3.3. INTERVALO MÍNIMO DE BASE

Da mesma forma que se estudou o tempo crítico base para intersecções prioritárias compostas por 4 ramos, é também importante perceber a influência do intervalo mínimo de base na determinação do nível de serviço de intersecções do mesmo tipo. O método utilizado foi o mesmo utilizado em 4.3.2. Como seria de esperar os resultados foram em tudo semelhantes aos obtidos no estudo das intersecções compostas por apenas 3 ramos e estão apresentados nos gráficos seguintes (figura 4.12).

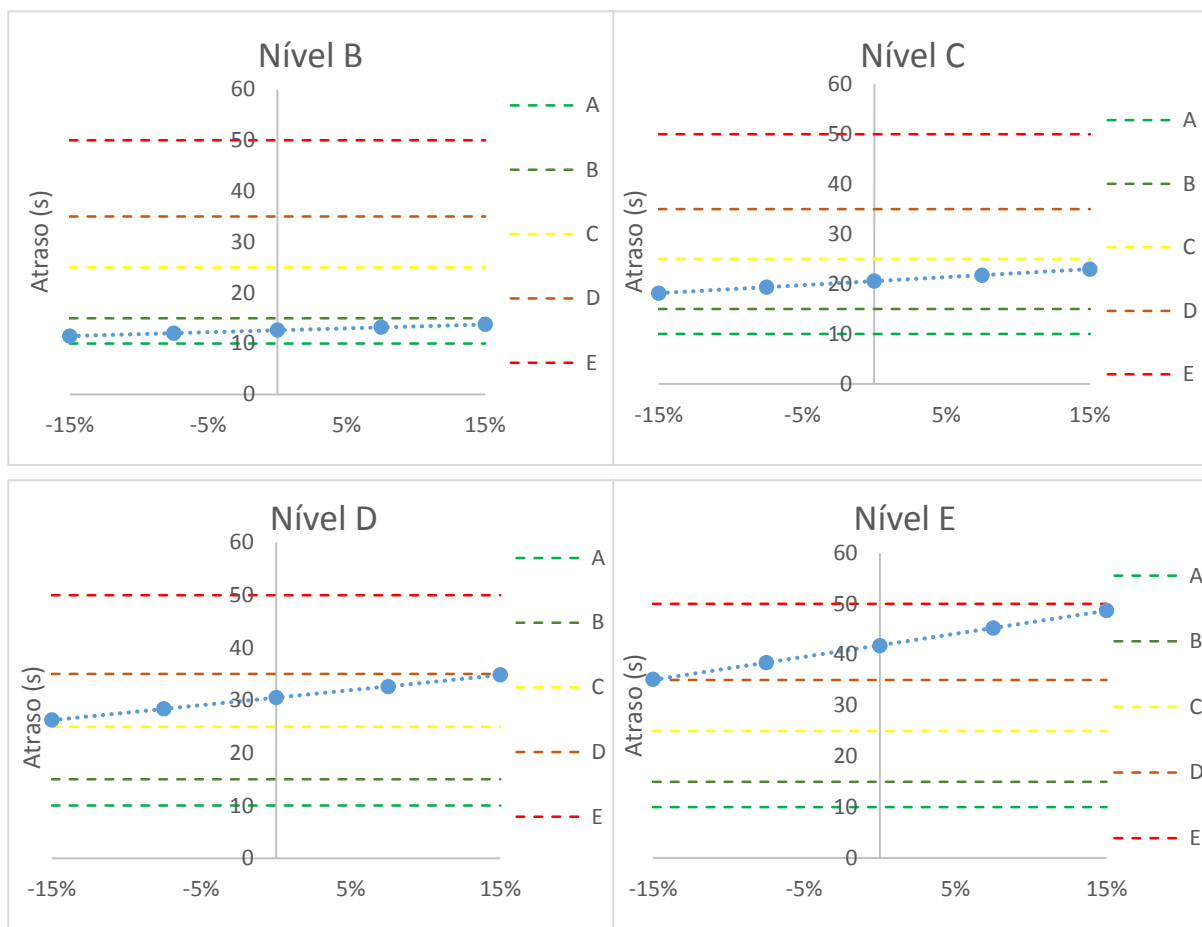


Figura 4. 12. Variação do atraso com o intervalo mínimo de base

É possível então concluir que o intervalo mínimo de base é um parâmetro que pouco influencia o valor final do atraso em intersecções prioritárias quer sejam compostas por 3 ou 4 ramos.

4.3.4. PERCENTAGEM DE PESADOS

Outra variável que foi considerada na metodologia para a determinação dos níveis de serviço em intersecções prioritárias que foi estudado foi a percentagem de pesados no volume de tráfego da referida intersecção. Para isso foram escolhidos 3 situações de volumes de tráfego diferentes e, mantendo para cada situação os volumes inalterados, foi sendo alterada a percentagem de pesados. Foram realizados 11 registos diferentes em que o primeiro corresponde a uma percentagem de pesados de 0% e o último a uma situação em que todos os veículos na intersecção prioritária sejam pesados. O gráfico seguinte (Fig. 4.13) demonstra as variações do atraso para as 3 situações referidas.

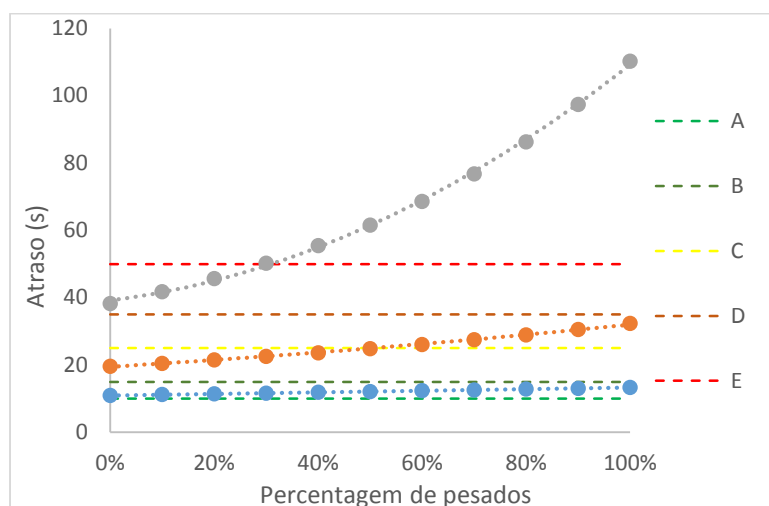


Figura 4.13. Variação do atraso com a percentagem de pesados

Pela observação do gráfico percebe-se que para percentagens de pesados mais usuais, ou seja, as que realmente se podem observar em intersecções prioritárias no território nacional (presumivelmente nunca superiores a 30%) não se registam grandes diferenças no valor do atraso sentido pelos condutores dos movimentos não prioritários. Pode-se também concluir que quanto maiores forem os volumes de chegada à intersecção prioritária, maior o impacto da percentagem de pesados no desempenho da intersecção.

4.3.5. MOVIMENTOS EM UMA OU DUAS FASES

O último fator estudado foi a diferença entre realizar os movimentos em uma ou em duas fases distintas. É importante perceber se, em locais onde não existam problemas ao nível do espaço, se a implementação de um separador central que permita os movimentos em duas fases é, ou não, uma boa forma de melhorar o desempenho global da intersecção, diminuindo, consequentemente, o atraso sentido pelos condutores dos movimentos não prioritários. Para perceber se esta seria uma medida eficaz ou não, foram realizadas várias simulações no programa de cálculo automático dos atrasos. Definiram-se várias situações com volumes de tráfego razoáveis para todos os movimentos existentes e registaram-se os atrasos dos movimentos não prioritários quando estes se realizam a uma ou duas fases. O gráfico seguinte apresenta os resultados obtidos.

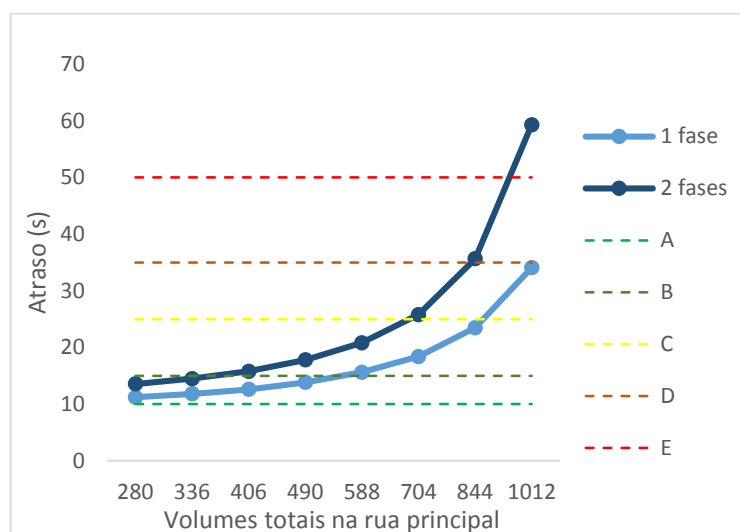


Figura 4.14. Atraso em função do volume de tráfego na rua principal

Pela observação do gráfico, facilmente se constata que, seguindo a metodologia do HCM 2010, os condutores não prioritários sentem um atraso menor em intersecções prioritárias em que os movimentos se realizem em apenas uma fase. Isto pode ser justificado por alguns valores base adotados no HCM 2010.

Os tempos críticos considerados no HCM 2010 para o conjunto das duas fases é superior ao adotado para os movimentos apenas numa fase. Obviamente que estes valores se refletem em atrasos superiores. Por outro lado, para volumes elevados, diminui a probabilidade de ocorrerem intervalos maiores entre veículos sucessivos. Isto conduz, obviamente, a valores de atrasos maiores para os movimentos realizados em duas fases, sendo que, como se observa no gráfico, as diferenças vão crescendo à medida que os volumes de tráfego aumentam.

Acresce ainda que os valores adotados no HCM 2010 foram seleccionados tendo em conta a realidade norte-americana e, eventualmente, poderá ser questionável a adoção de um valor inferior para uma fase relativamente ao total adotado para as duas fases.

5

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1. CONCLUSÃO

As intersecções prioritárias são bastante importantes no funcionamento global da rede rodoviária pois são pontos onde se cruzam todos os movimentos de duas ou mais correntes de tráfego. São infraestruturas rodoviárias muito utilizadas no território nacional devido ao seu custo reduzido e alta eficácia. Neste tipo de intersecções há sempre um dos ramos que é o principal e os veículos que circulam nesse ramo têm prioridade sobre os que circulam no ramo secundário. Ao contrário dos movimentos do ramo principal, os veículos que pretendem realizar movimentos a partir da rua secundária, como são sempre obrigados a ceder passagem aos veículos dos movimentos prioritários, normalmente sofrem alguma demora até poderem efetuar em segurança o movimento pretendido. Para se conseguir avaliar se esse atraso sentido pelos condutores é admissível, o HCM propõe uma metodologia de cálculo que dependendo de certos fatores, tanto geométricos como de tráfego, apresenta um valor médio do atraso sentido pelos condutores para a intersecção prioritária em estudo e classifica-o no nível de serviço correspondente. Contudo, o facto da metodologia proposta envolver muitos cálculos intermédios, alguns bastante extensos, facilmente leva o utilizador a cometer erros quando os cálculos são realizados manualmente. Assim, desenvolveu-se uma ferramenta de cálculo automático que permite realizar esses cálculos eliminando ou minimizando os erros, em que o utilizador apenas tem de conhecer bem as características da intersecção e introduzi-las no programa. Após o desenvolvimento da ferramenta de cálculo automático e com a ajuda de exemplos já resolvidos, concluiu-se que o programa executa a metodologia sem falhas, cobrindo as diferentes situações apresentadas no HCM.

Com o auxílio do programa desenvolvido e devido à facilidade da sua utilização foi então possível que se realizasse um estudo mais aprofundado sobre a determinação dos atrasos e respetivos níveis de serviço em intersecções prioritárias. Este estudo envolveu uma alteração nalguns dos valores estipulados pelo HCM que, como são valores selecionados tendo em conta a realidade norte-americana, que é diferente da realidade europeia, seria importante perceber até que ponto a variação desses valores poderia alterar o valor final do atraso sentido pelos condutores que pretendem realizar movimentos não prioritários.

Primeiramente foi estudado a importância da existência ou não de uma via exclusiva destinada às viragens à esquerda na rua principal. Chegou-se à conclusão que a diferença dos valores de atrasos que se obtém, quer nos movimentos da rua secundária quer nos movimentos da rua principal, não é significativa, embora a existência da via destinada às viragens à esquerda, desde que tenha o comprimento adequado, elimine os atrasos nos veículos que circulam na rua principal.

Foram estudados outros parâmetros, nomeadamente o tempo crítico base e o intervalo mínimo de base. Como já foi referido anteriormente, os valores seleccionados pelo HCM são relativos aos hábitos de condução praticados nos Estados Unidos da América. É então importante perceber a influência destes dois fatores no desempenho global das intersecções prioritárias pois os hábitos europeus de condução são diferentes. Depois de realizados vários testes para diferentes condições de circulação utilizando a ferramenta desenvolvida, foi possível chegar à conclusão que o intervalo mínimo base é um parâmetro com uma expressão muito reduzida no valor final do atraso, enquanto para intersecções prioritárias com volumes de tráfego elevados (correspondentes aos níveis de serviço D e E) o tempo crítico base tem um papel importante no desempenho global das intersecções prioritárias, pois uma ligeira variação desse tempo provoca uma grande variação do valor do atraso sentido pelos condutores.

A influência da percentagem de pesados no valor final do atraso dos movimentos não prioritários, também foi analisada. Tal como na análise do tempo crítico base, a percentagem de pesados que integram as correntes de tráfego que circulam na intersecção prioritária apenas ganha expressão na determinação do nível de serviço para intersecções prioritárias com elevados volumes de tráfego. No entanto, para valores de percentagens de pesados aceitáveis (no máximo 30%) não há variação significativa no valor do atraso.

O último fator que foi estudado foi a possibilidade de os movimentos de atravessamento ou de viragem à esquerda na rua secundária se realizarem em duas fases ou apenas numa fase. Deste estudo comparativo foi obtido um resultado um pouco surpreendente, pois foi constatado que os valores dos atrasos correspondentes aos movimentos não prioritários são menores quando os movimentos se realizam em apenas uma fase. Este resultado pode ser explicado pelo facto dos valores dos tempos críticos base e dos intervalos mínimos de base adotados no HCM serem bastantes superiores nos atravessamentos em duas fases quando comparados com os propostos para os atravessamentos numa fase.

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Na sequência do trabalho realizado nesta dissertação, e uma vez que se dispõe de ferramenta que permite determinar de forma automática os valores dos atrasos associados aos movimentos não prioritários, seria interessante realizar um vasto trabalho de campo de recolha de dados, que não estava previsto no âmbito desta dissertação, de modo a confirmar todos os valores propostos no HCM 2010. Como se referiu, os valores adotados são função da realidade norte-americana, distinta da realidade portuguesa nomeadamente no que concerne aos hábitos e comportamento dos condutores e ainda no que respeita às características dos veículos, pelo que se deve, em desenvolvimentos futuros, averiguar da sua aplicabilidade em Portugal. Por outro lado, algumas das expressões propostas no HCM foram obtidas com recurso a modelos empíricos, pelo que é relevante averiguar igualmente, em estudos posteriores, a sua aplicabilidade à realidade portuguesa.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Transportation Research Board, *Highway Capacity Manual*, Washington, DC. 2010.
- [2] Apontamentos da UC Circulação e Transportes 1, FEUP